

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NAYLA MARIA SALVADOR

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS  
EM REGIÃO DE TRANSIÇÃO RIO-RESERVATÓRIO IDEALIZADA  
PARCIALMENTE CONFINADA

CURITIBA

2020

NAYLA MARIA SALVADOR

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS  
EM REGIÃO DE TRANSIÇÃO RIO-RESERVATÓRIO IDEALIZADA  
PARCIALMENTE CONFINADA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. William Bonino Rauen

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S182a Salvador, Nayla Maria  
Avaliação de processos hidrossedimentológicos em região de transição rio-reservatório idealizada parcialmente confinada [recurso eletrônico] / Nayla Maria Salvador. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2020.

Orientador: William Bonino Rauen.

1. Reservatórios. 2. Sedimentos fluviais. 3. Transporte de sedimentos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Rauen, William Bonino. III. Título.

CDD: 551.353

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NAYLA MARIA SALVADOR**, intitulada: **AValiação DE PROCESSOS HIDROSSedimentológicos EM REGião DE transição RIO-RESERVATÓRIO PARcialMENTE CONfinada**, sob orientação do Prof. Dr. WILLIAM BONINO RAUEN, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo Colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

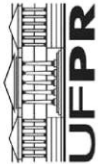
Curitiba, 27 de Fevereiro de 2020.

WILLIAM BONINO RAUEN  
Presidente da Banca Examinadora

JOSÉ JUNJI OTA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

EIMMANUEL KENNEDY DA COSTA TEIXEIRA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI)

TOBIAS BERNWARD BLENINGER  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



## EXTRATO DE ATA

**Ata da 250ª Reunião do Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental**, com início às onze horas e trinta minutos do dia quinze de maio de dois mil e vinte, por videoconferência, pela plataforma Jitsi. Presentes: Coordenação do PPGERHA: Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes e Daniel Costa dos Santos; Representante do Departamento Hidráulica e Saneamento: André Luiz Tonso Fabiani; Representantes da área de Engenharia Ambiental: Heloise Garcia Knapik, Regina Kishi e Ramiro Etchepare; Representantes da área de Recursos Hídricos e Ambiental: Daniel Dotzel e Tobias Bleninger; Representante Discente do Mestrado: Henrique Degraf e Arthur H. R. Ferreira, os convidados e demais interessados. Aberta a sessão, passou-se para a Ordem do dia:

**2) Solicitação de homologação de título ajustado de dissertação de mestrado aprovada pela banca**: Aprovado, por unanimidade, a solicitação encaminhada pelo Prof. William Bonino Rauen, do ajuste de título da dissertação de Mestrado na ata da aluna Nayla Salvador, realizada em 27/02/2020, alterando o título para "Avaliação de processos hidrossedimentológicos em região de transição rio-reservatório idealizada parcialmente confinada" em substituição a "Avaliação de processos hidrossedimentológicos em região de transição rio-reservatório parcialmente confinada".

Nada mais havendo para tratar, o Professor Cristóvão Vicente S. Fernandes, deu por encerrada a sessão, da qual, para constar, eu, Thalita Nishimoto, lavrei a presente ata.

Curitiba, 15 de maio de 2020

Prof. Dr. Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes  
Coordenação do PPGERHA



Dedico este trabalho aos meus pais Nivaldo e Erminia por estarem sempre ao meu lado ao longo da vida. Dedico também às minhas irmãs Flávia e Talitha por sempre me apoiarem. E aos meus avós Conceição, Antônio (*in memorian*), Angelina (*in memorian*) e Herminio (*in memorian*) por sempre foram grandes exemplos para mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por sempre ser fiel.

Aos meus pais, Nivaldo e Ermínia, por todo apoio, carinho e incentivo. Vocês me ensinam muito nessa vida.

Às minhas irmãs, Flávia e Talitha, por todos os momentos de descontração, carinho e conversas nesses três anos. Obrigada por sempre estarem comigo.

Ao meu amigo Marlon que desde a época de faculdade sempre me socorre e me ouve nos momentos de loucura.

Às minhas amigas Andressa e Maria Amélia por sempre se fazerem presentes em minha vida.

Ao professor Dr. William Bonino Rauen por todos os ensinamentos, orientações e suporte prestado. Agradeço também por ter acreditado em mim mesmo com todos os acontecimentos decorrentes nesses três anos.

Aos professores do PPGERHA, por todo conhecimento aprendido nas matérias. Em especial ao professor Dr. Cristovão Fernandes, por sempre me aconselhar.

Aos membros da secretaria do DHS por todo auxílio prestado.

À CAPES, pelo suporte financeiro oferecido no decorrer do mestrado.

## RESUMO

Processos hidrossedimentológicos em regiões de transição rio-reservatório tipicamente apresentam expressiva variabilidade espacial e temporal, com efeito dominante exercido por sua geometria. Este estudo avalia como tais processos podem ser afetados por um confinamento parcial de região de transição idealizada de rio-reservatório subtropical de porte médio, com hipótese de aumento da eficiência de retenção de sedimentos (ERS) causado por descontinuidade hidrodinâmica. Foi empregada modelagem computacional 3D da hidrodinâmica e do transporte e deposição de sedimentos coesivos suspensos para estimar a ERS da região de transição sob três configurações geométricas: i) sem confinamento (região de transição rio-reservatório com alargamento monotônico de montante para justante); ii) parcialmente confinada (estreitamento de seção) com canal retilíneo de ligação com o restante do reservatório; e iii) parcialmente confinada com canal de ligação sinuoso. Foram realizados testes preliminares de estabilidade das simulações, adequação da malha computacional, conservação de massa e convergência para regime permanente. Em seguida, 68 cenários foram simulados contemplando variações em parâmetros hidrossedimentológicos, como a vazão fluvial, o aporte sólido e a velocidade de queda dos sedimentos, além do vento (intensidade, direção e sentido), como parâmetro meteorológico. Confirmou-se a hipótese de que o confinamento parcial pode promover aumento da ERS da região de transição sob boa parte das condições simuladas, com pequena redução da ERS em apenas um dos cenários testados. O aumento máximo estimado da ERS foi de 16% e ocorreu quando havia um padrão de recirculação horizontal mais intenso e abrangente no interior da região parcialmente confinada. Especialmente para situações com aporte sólido fluvial expressivo e reservatórios sob sério risco de assoreamento, esse resultado sugere a possibilidade de que tais regiões exerçam o efeito de um pré-reservatório integrado ao corpo de água principal, podendo ser considerada como uma das medidas voltadas ao controle do assoreamento.

Palavras-chave: Deposição de sedimentos. Transição rio-reservatório. Descontinuidade hidrodinâmica. Controle do assoreamento. Modelagem de CFD

## ABSTRACT

Hydro-sedimentological processes in river-reservoir transition regions typically show significant spatial and temporal variability, with a dominant effect exerted by their geometry. This study evaluated how these processes can be affected by partial confinement of an idealised transition region of a medium-sized subtropical reservoir, with the hypothesis of increased sediment trapping efficiency (STE) caused by hydrodynamic discontinuity. Three-dimensional computational modelling of the hydrodynamics and transport and deposition of suspended cohesive sediments was used to estimate STE for the transition region under three geometric configurations: i) without confinement (transition region with monotonic width increase); ii) partial confinement caused by cross-section narrowing, with a straight channel connecting it to the rest of the reservoir; and iii) partial confinement with a sinuous connecting channel. Preliminary testing was undertaken to confirm stability, mesh independence, mass conservation and steady state conditions of the modelling approach. Then, 68 scenarios were simulated considering changes in hydro-sedimentological parameters, such as the river discharge, fluvial sediment load and sediment fall velocity, in addition to varying wind conditions (intensity, direction and orientation), as a meteorological parameter. The results confirmed the hypothesis that partial confinement can increase STE of the transition region under a range of simulated conditions, with a small STE reduction being observed for only one of the scenarios tested. The maximum estimated STE increase was 16%, which occurred when there was an intense and widespread horizontal recirculation pattern within the confined region. Especially for situations with significant fluvial sediment load and reservoirs under serious siltation risk, this result suggested the possibility of such regions functioning as a pre-reservoir integrated to the main reservoir, which can be considered as part of measures aimed at siltation control.

**Keywords:** Sediment deposition. River-reservoir transition. Hydrodynamic discontinuity. Siltation control. CFD modelling



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE SHIELDS .....	26
FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÕES VERTICAIS DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS TÍPICAS DE CURSOS DE ÁGUA, EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA DO SEDIMENTO .....	28
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÕES TÍPICAS DA VELOCIDADE, CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS E DESCARGA SÓLIDA EM CURSOS DE ÁGUA.....	29
FIGURA 4 - CURVAS DE EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS, SEGUNDO BRUNE.....	33
FIGURA 5 - CURVAS DE EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS, SEGUNDO CHURCHILL .....	34
FIGURA 6 – LIMITE DA BACIA DO RIO PASSAÚNA, LIMITES MUNICIPAIS E DIVISÃO DAS SUB-BACIAS DO ALTO IGUAÇU.....	58
FIGURA 7 - REGIÃO DE TRANSIÇÃO RIO-RESERVATÓRIO PASSAÚNA, COM DESTAQUE PARA O ESPELHO DE ÁGUA VISÍVEL EM FOTOS DE SATÉLITE (ADAPTADO DE GOOGLE EARTH, 2020).....	59
FIGURA 8 – CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DIMENSIONADAS PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	62
FIGURA 9 - TENSÃO DE CISALHAMENTO NA CAMADA PRÓXIMA AO LEITO, PARA A GEOMETRIA G.02, VAZÃO 3,0 m³/s, E VENTO OBLÍQUO V5NLSO. ....	67
FIGURA 10 – ESTRUTURA HORIZONTAL DA MALHA M10 DE DIMENSÕES 10X10M PARA A GEOMETRIA G.02.....	68
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES VIRTUAIS DE ANÁLISE DE RESULTADOS PARA O TESTE DE MALHAS .....	70
FIGURA 12 – PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE RESULTANTE HORIZONTAL, NA ESTAÇÃO E01 .....	71
FIGURA 13 - PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE RESULTANTE HORIZONTAL, NA ESTAÇÃO E02 .....	71
FIGURA 14 – PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE RESULTANTE HORIZONTAL, NA ESTAÇÃO E03 .....	72
FIGURA 15 – PARAMETRO DE DESVIO REFERENTE AO PERFIL DE VELOCIDADE RESULTANTE DA ESTAÇÃO E01 .....	73
FIGURA 16 - PARAMETRO DE DESVIO REFERENTE AO PEFIL DE VELOCIDADE RESULTANTE DA ESTAÇÃO E02 .....	73
FIGURA 17 - PARAMETRO DE DESVIO REFERENTE AO PEFIL DE VELOCIDADE RESULTANTE DA ESTAÇÃO E03 .....	74

FIGURA 18 - PERFIS VERTICAIS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA ESTAÇÃO E01	76
FIGURA 19 – PERFIS VERTICAIS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA ESTAÇÃO E02	77
FIGURA 20 - PERFIS VERTICAIS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA ESTAÇÃO E03	77
FIGURA 21 – PERFIS VERTICAIS DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA ESTAÇÃO E01 .....	78
FIGURA 22 - PERFIS VERTICAIS DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA ESTAÇÃO E02 .....	78
FIGURA 23 – PERFIS VERTICAIS DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA ESTAÇÃO E03 .....	79
FIGURA 24 – DESVIOS RELATIVOS REFERENTES A TAU E CSS NA ESTAÇÃO E01 ...	79
FIGURA 25 – DESVIOS RELATIVOS REFERENTES A TAU E CSS NA ESTAÇÃO E02 ...	80
FIGURA 26 – DESVIOS RELATIVOS REFERENTES A TAU E CSS NA ESTAÇÃO E03 ...	80
FIGURA 27– VARIAÇÃO TEMPORAL DO PERFIL LONGITUDINAL DA VAZÃO VOLUMÉTRICA, INDICANDO CONSERVAÇÃO DE MASSA E CONVERGÊNCIA PARA REGIME PERMANENTE HIDRODINÂMICO A PARTIR DE T = 24H NAS SIMULAÇÕES COM VAZÃO NOMINAL DE 3 m³/s .....	84
FIGURA 28 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO PERFIL LONGITUDINAL DA DESCARGA SÓLIDA PARA $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$ m/s, $CSI=0$ mg/L, $C_{IN}= 10$ mg/L, INDICANDO CONVERGÊNCIA PARA REGIME PERMANENTE HIDROSEDIMENTOLÓGICO A PARTIR DE T = 24 h NAS SIMULAÇÕES COM VAZÃO NOMINAL DE 3 m³/s .....	85
FIGURA 29 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO PARÂMETRO DE DESVIO ENTRE PERFIS LONGITUDINAIS CONSECUTIVOS DE DESCARGA SÓLIDA, INDICANDO CONVERGÊNCIA NO PADRÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, CONFORME OBTIDO PARA $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$ m/s.....	86
FIGURA 30 – PERCENTUAL DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS POR TRECHO AO LONGO DO CORPO HÍDRICO, CORRESPONDENTE A 3 DIAS DE SIMULAÇÃO, PARA $CSI = 0$ mg/L, $C_{IN} = 10$ mg/L E $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$ m/s .....	87
FIGURA 31 – PERCENTUAL DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS ACUMULADA POR TRECHO AO LONGO DO CORPO HÍDRICO, CORRESPONDENTE A 3 DIAS DE SIMULAÇÃO, PARA $CSI = 0$ mg/L, $C_{IN} = 10$ mg/L E $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$ m/s . .....	87
FIGURA 32 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m³/s, GEOMETRIA G.02 E VENTO V5OL (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO).....	92
FIGURA 33 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 1,0 m³/s, GEOMETRIA G.02 E VENTO V5OL (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO).....	93
FIGURA 34 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m³/s, PARA CONDIÇÃO SEM VENTO (V0) E PARA A GEOMETRIA G.02 (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO). .....	96

FIGURA 35 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m³/s, CONDIÇÃO COM VENTO (V5OL) E PARA A GEOMETRIA G.02 (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO) .....	97
FIGURA 36 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m³/s, CONDIÇÃO COM VENTO (V5NLSO) E PARA A GEOMETRIA G.02 (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO) .....	98
FIGURA 37 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m³/s, DA CAMADA CENTRAL DA CONDIÇÃO COM VENTOS V5NLSO (A) E V2NLSO (B), PARA A GEOMETRIA G.02 .....	100
FIGURA 38 - CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA CONDIÇÃO SEM VENTO E VAZÃO 3,0 m³/s PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C) .....	102
FIGURA 39 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO EM VISTA 3D PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO 3,0 m³/s E SEM VENTO PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C).....	103
FIGURA 40 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA CAMADA CENTRAL PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO 3,0 m³/s E VENTO LONGITUDINAL V5OL PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C) .....	105
FIGURA 41 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ, AO LONGO DO EIXO DE SIMETRIA, PARA GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C), PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO 3,0 m³/s E VENTO V5OL.....	106
FIGURA 42 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA CAMADA CENTRAL PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO 3,0 m³/s E VENTO OBLIQUO V5NLSO PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C) .....	107
FIGURA 43 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ (A) E VISTA 3D (B) PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO 3,0 m³/s, VENTO OBLIQUO V5NLSO PARA A GEOMETRIA G.01. ....	108
FIGURA 44 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ (A) E VISTA 3D (B) PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO 3,0 m³/s, VENTO OBLIQUO V5NLSO PARA A GEOMETRIA G.02. ....	109
FIGURA 45 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ (A) E VISTA 3D (B) PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO 3,0 m³/s, VENTO OBLIQUO V5NLSO PARA A GEOMETRIA G.03. ....	110

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DO NÚMERO DE ROUSE .....	29
QUADRO 2 – PASSOS METODOLÓGICOS QUE COMPUSERAM A ESTRATÉGIA DE INVESTIGAÇÃO .....	52



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DO PORTE DE RESERVATÓRIOS .....	35
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DAS DAS MALHAS COMPUTACIONAIS IDENTIFICADAS EM ESTUDO SEMELHANTES .....	47
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA E CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS IDENTIFICADAS EM ESTUDOS SEMELHANTES .....	48
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS QUANTO A ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA E INTENSIDADE DO VENTO IDENTIFICADAS EM ESTUDOS SEMELHANTES .....	48
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS IDENTIFICADAS EM ESTUDOS SEMELHANTES .....	49
TABELA 6 – MEDIÇÃO DO VENTO NO INTERVALO DE TEMPO DE UM MINUTO NO TECPAR NOS ANOS DE 2015 A 2016. ADAPTADO MARCON (2018) .....	60
TABELA 7 – VALORES DE AS E V PARA AS GEOMETRIAS DIMENSIONADAS .....	61
TABELA 8 – FAIXA DE VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS .....	63
TABELA 9 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS E DE VENTO, PARA MESMAS CONDIÇÕES DE VAZÃO, CSI-C <sub>IN</sub> E W <sub>S</sub> .....	64
TABELA 10 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES DE WS, PARA MESMAS CONDIÇÕES DE VAZÃO, GEOMETRIA, VENTO E CSI-C <sub>IN</sub> .....	64
TABELA 11 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES DE CSI E CIN, PARA MESMAS CONDIÇÕES DE VAZÃO, GEOMETRIA, VENTO E W <sub>S</sub> .....	65
TABELA 12 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES DE VAZÃO, PARA MESMAS CONDIÇÕES DE WS, GEOMETRIA, VENTO E CSI-C <sub>IN</sub> .....	66
TABELA 13 – DISPOSIÇÃO DE NÍVEIS SIGMA NAS CONFIGURAÇÕES DE MALHA VERTICAL DE NÚMEROS 1 A 8 .....	69
TABELA 14 – DISPOSIÇÃO DE NÍVEIS SIGMA NAS CONFIGURAÇÕES DE MALHA VERTICAL DE NÚMEROS 9 A 17 .....	70
TABELA 15 - MÉDIA E MEDIANA DO PARAMETRO DE DESVIO NOS PERFIS DE VELOCIDADE RESULTANTE, PARA CADA MALHA .....	74
TABELA 16 – MÉDIA E MEDIANA DO PARAMETRO DE DESVIO NOS PERFIS VERTICAIS DA COMPONENTE DE VELOCIDADE W, PARA CADA MALHA M10 .....	75
TABELA 17 – VALORES MÉDIOS E MEDIANOS DOS DESVIOS NOS PERFIS DE TAU, CSS E VALORES DE ERS .....	81
TABELA 18 – SIMULAÇÕES COM A MALHA HORIZONTAL DE 5X5m .....	81
TABELA 19 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA CONCENTRAÇÕES SUSPENSAS COM W <sub>S</sub> = 6,6 X 10 <sup>-5</sup> m/s .....	82

TABELA 20 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA CONCENTRAÇÕES SUSPENSAS COM $W_s = 6,6 \times 10^{-6}$ m/s .....	82
TABELA 21 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE VAZÃO .....	91
TABELA 22 - CONDIÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS PARA A ERS NA CONDIÇÃO SEM VENTO .....	94
TABELA 23 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS VENTOS LONTIGUTINAIS E $W_s$ .....	94
TABELA 24 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS VENTOS OBLÍQUOS E $W_s$ .....	97
TABELA 25 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DO VENTO NA ERS .....	99
TABELA 26 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA ERS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE VENTO. ....	100
TABELA 27 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA ERS PARA AS VAZÕES $Q = 3,0$ m³/s, $Q = 1,0$ m³/s E $Q = 0,1$ m³/s, VENTO V5LO E $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$ m/s.....	111
TABELA 28 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA ERS PARA $W_s = 6,6 \times 10^{-6}$ m/s .....	112

## LISTA DE SIMBOLOS

$a_0$	- Constante dependente das propriedades do leito ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )
$A_H$	- Coeficiente de difusividade horizontal ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$A_s$	- Área da superfície líquida ( $\text{m}^2$ )
$B$	- Largura (m)
$b$	- Número de Rouse (adimensional)
$C$	- Velocidade máxima gravitacional de onda interna ( $\text{m}/\text{s}$ )
$C_D$	- Coeficiente de arrasto (adimensional)
$C_{IN}$	- Concentração suspensas do aporte fluvial ( $\text{mg}/\text{L}$ )
$C_{sb}$	- Concentração de sedimentos coesivos suspensos próximo ao leito ( $\text{mg}/\text{L}$ )
$CSI$	- Concentração inicial de sedimentos suspensos no reservatório ( $\text{mg}/\text{L}$ )
$C_{ss}$	- Concentração de sedimentos suspensos ( $\text{mg}/\text{L}$ )
$C_T$	- Coeficiente que atende a condição de estabilidade CFL ( $\text{m}/\text{s}$ )
$D$	- Diâmetro da partícula (m)
$d$	- Diâmetro mediano da partícula no leito (m)
$d_{50}$	- Diâmetro característico do sedimento (m)
$D_k$	- Taxa de deposição de sedimentos ( $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$ )
$E$	- Potencial de resuspensão ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )
$E_k$	- Taxa de resuspensão de sedimentos ( $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$ )
$ERS$	- Eficiência de retenção de sedimentos (%)
$f$	- Parâmetro de Coriolis ( $\text{s}^{-1}$ )
$F_x$	- Processo análogo a difusão molecular em relação a U
$F_y$	- Processo análogo a difusão molecular em relação a V
$g$	- Aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
$H$	- Profundidade batimétrica (m)
$\dot{H}$	- Fluxo de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$K_H$	- Coeficiente de difusividade vertical ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$K_M$	- Coeficiente de viscosidade cinemática vertical ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$L$	- Comprimento (m)
$m$	- Constante dependente do ambiente de deposição (adimensional)
$\dot{M}_{IN}$	- Fluxo de massa de entrada ( $\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}$ )
$\dot{M}_{ss}$	- Fluxo de massa de saída ( $\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}$ )

$\dot{M}_r$	- Fluxo de massa retido (kg/m <sup>2</sup> s)
$\dot{M}_t$	- Fluxo de massa total (kg/m <sup>2</sup> s)
n	- Constante dependente do ambiente de deposição (adimensional)
p	- Pressão (N/m <sup>2</sup> )
P	- Probabilidade de deposição de sedimentos (adimensional)
q	- Energia cinética turbulenta
Q	- Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>s</sub>	- Descarga sólida em suspensão (kg/s)
Re*	- Reynolds de atrito (adimensional)
S	- Salinidade (psu)
$\dot{S}$	- Fluxo de salinidade
S <sub>s</sub>	- Densidade relativa dos grãos de sedimento (adimensional)
t	- Tempo (s)
Tau <sub>cr</sub>	- Tensão de cisalhamento líquido (dina/cm <sup>2</sup> )
T <sub>d</sub>	- Tempo após a deposição (s)
U	- Componentes da velocidade do escoamento na direção x (m/s)
U <sub>máx</sub>	- Componentes da velocidade máxima do escoamento na direção x (m/s)
U <sub>v</sub>	- Velocidade do vento (m/s)
V	- Componentes da velocidade do escoamento na direção y (m/s)
V <sub>b</sub>	- Velocidade resultante no primeiro ponto de malha em relação ao leito (m/s)
V <sub>res</sub>	- Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )
W	- Componentes da velocidade do escoamento na direção z (m/s)
W <sub>b</sub>	- Velocidade de queda da partícula próximo ao leito (m/s)
W <sub>s</sub>	- Velocidade de queda da partícula (m/s)
x	- Eixo longitudinal
y	- Eixo transversal
z	- Eixo vertical
z <sub>0</sub>	- Coeficiente de rugosidade do leito (m)
z <sub>b</sub>	- Altura do primeiro ponto de malha em relação ao leito (m)
$\sigma$	- Desvio
$l$	- Macroescala da turbulência



$\kappa$	- Constante de von Karman (adimensional)
$\gamma$	- Peso específico da água (N/m <sup>3</sup> )
$\gamma_s$	- Peso específico do sedimento (N/m <sup>3</sup> )
$u_*$	- Velocidade de atrito (m/s)
$u_{\tau b}$	- Velocidade de atrito associada à tensão de cisalhamento no leito (m/s)
$u_{\tau s}$	- Velocidade de atrito causada pelo vento (m/s)
$\vec{V}$	- Vetor velocidade resultanteVelocidade (m <sup>2</sup> /s)
$\nu$	- Viscosidade cinemática do fluido
$\tau_b$	- Tensão de cisalhamento do leito (dina/cm <sup>2</sup> )
$\tau_{bx}$	- Tensão de cisalhamento no leito em relação a x (dina/cm <sup>2</sup> )
$\tau_{by}$	- Tensão de cisalhamento no leito em relação a y (dina/cm <sup>2</sup> )
$\tau_c$	- Tensão de cisalhamento crítica para erosão (dina/cm <sup>2</sup> )
$\tau_{c^*}$	- Tensão de cisalhamento crítica para o critério de Shields
$\tau_d$	- Tensão de cisalhamento crítica de deposição (dina/cm <sup>2</sup> )
$\tau_{oy}$	- Tensão superficial causada pelo vento em relação a y (N/m <sup>2</sup> )
$\tau_{ox}$	- Tensão superficial causada pelo vento em relação a x (N/m <sup>2</sup> )
$\Delta T$	- Passo de tempo interno (s)
$\Delta x$	- Dimensão da célula da malha horizontal em relação a x (m)
$\Delta y$	- Dimensão da célula da malha horizontal em relação a y (m)
$\eta$	- Elevação da superfície da água (m)
$\Theta$	- Temperatura (°C)
$\mu$	- Viscosidade dinâmica do fluido (kg/m/s)
$\rho$	- Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_o$	- Densidade de referência (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	- Massa específica do grão (kg/m <sup>3</sup> )
$\Psi$	- Parâmetro de Shields (adimensional)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>21</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
3.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS .....	22
3.2 CONSERVAÇÃO DE MASSA E QUANTIDADE DE MOVIMENTO EM ESCOAMENTOS .....	23
3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	24
3.3.1 Deposição de sedimentos em reservatórios .....	32
3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS .....	35
3.5 ESTUDOS SEMELHANTES .....	38
<b>4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>50</b>
4.1 CLASSIFICAÇÃO E ESTRATÉGIA DA PESQUISA .....	50
4.2 PASSOS METODOLÓGICOS .....	51
4.2.1 Seleção do modelo computacional .....	51
4.2.4 Criação e teste de malhas computacionais .....	68
4.2.5 Análises de Sensibilidade, Conservação de Massa no Escoamento e Alcance de Regime Permanente.....	81
4.2.6 Execução das Simulações Principais .....	87
4.2.7     Processamento e Análise de Resultados .....	88
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>90</b>
5.1. IMPORTÂNCIA RELATIVA DA VAZÃO, DO VENTO E DA VELOCIDADE DE QUEDA DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NA ERS.....	90
5.2 EFEITOS DO CONFINAMENTO PARCIAL .....	100
<b>6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios de água têm um papel essencial para o abastecimento público e a geração de energia elétrica para a sociedade. Sua principal função é a regulação do fornecimento de água para uso antrópico, cujas principais fontes são rios e águas subterrâneas (MEGER, 2007). As características da bacia hidrográfica interferem no padrão de aporte de sedimentos e nutrientes, por meio do escoamento superficial. A intensidade desse aporte depende das condições hidrológicas, as quais influenciam aspectos como a morfologia de corpos de água e a qualidade dessas águas.

Uma alta taxa de aporte de sedimentos aumenta a descarga sólida nos rios, o que tende a favorecer o assoreamento em reservatórios, acarretando a perda de volume, comprometendo sua vida útil e fomentando processos como eutrofização do corpo de água (CARVALHO, 1994). Tais questões justificam, em geral, estudos que contribuam ao entendimento de processos hidrossedimentológicos para auxiliar tomadas de decisão de manejo da bacia hidrográfica e gestão de reservatórios, pois os fenômenos que ali ocorrem não afetam apenas o meio natural, mas também a economia e a população.

A deposição de sedimentos em reservatórios é influenciada pelas condições do escoamento em seu interior, as quais podem incluir recirculações nos planos horizontal e vertical, além de caminhos preferenciais e correntes de densidade. Tais processos hidrodinâmicos dependem de forçantes como a vazão de rios, vento e características do aporte sólido (FISCHER, 1979; MORILLO et al., 2006). Além disso, podem ser influenciados pela geometria do corpo de água, de modo a favorecer ou prejudicar a retenção de sedimentos e substâncias a eles associadas, seja no corpo de água como um todo, seja em subregiões do mesmo.

Buscando o gerenciamento e controle de sedimentos em reservatórios, técnicas podem ser aplicadas para mitigar a retenção de sedimentos nesses corpos hídricos. Segundo Kondolf et al. (2014) as principais técnicas conhecidas para tal mitigação são: desvios de sedimentos por meio de canais, os quais transportam os sedimentos a montante da barragem; *sluicing*, que por meio de uma vazão de alto fluxo transporta o sedimento de forma suspensa o mais rápido possível, minimizando a sedimentação; *flushing*, que objetiva a resuspensão de sedimentos depositados e para transporte a jusante; *checkdams*, que capturam os sedimentos antes de chegar

no reservatório; regiões de confinamento (pré-reservatórios) localizadas a montante de um reservatório, que concentram a retenção do aporte sólido e mitigam o assoreamento do reservatório principal (PAUL; PUTZ, 2008); e a retirada de sedimentos do leito por meio de dragagem (KONDOLF; SCHMITT, 2018). Tais técnicas podem ser utilizadas de modo isolado ou combinado e frequentemente também mitigam a retenção de contaminantes agregados ao sedimento, contribuindo tanto para a gestão de sedimentos quanto para o controle da qualidade da água. A tomada de decisão associada à adoção de tais técnicas deve ser feita caso-a-caso, considerando suas vantagens e desvantagens.

Regiões confinadas situadas a montante de reservatórios são tratadas como pré-reservatórios por Paul e Putz (2008), formadas por barramentos implementados no curso fluvial a montante do reservatório principal para reter parte do aporte sólido, de modo controlado. Sua eficácia quanto à retenção de sedimentos e contaminantes guarda dependência com a forma de operação (PAUL; PUTZ, 2008) e com as características geométricas e hidrossedimentológicas do corpo hídrico formado (KANTOUSH; SCHLEISS, 2014). O projeto dessas regiões pode contemplar a previsão de operações de dragagem de modo localizado, em seu interior, reduzindo ou eliminando a demanda por dragagem ou outra intervenção para controle do assoreamento no reservatório principal.

Em Curitiba-PR, um dos principais reservatórios de abastecimento público é o reservatório do rio Passaúna, localizado na divisa com os municípios de Campo Largo e Araucária (IAP, 2017). Tal reservatório está situado na bacia hidrográfica do rio Passaúna, sendo esta uma sub-bacia da bacia do Alto Iguaçu. Sauniti et al. (2004), Siqueira (2014), SEWAMA (2017), Silva e Rauen (2017) e Rauen et al. (2018) avaliaram o assoreamento no reservatório do Passaúna com enfoque na estimativa de perda volumétrica e vida útil, por meio de levantamentos de campo e modelagem computacional hidrossedimentológica zero-dimensional (0D) e unidimensional (1D). Notou-se que as abordagens de modelagem geraram estimativas similares em termos da proporção do aporte sólido que fica retida no reservatório, que teria uma eficiência de retenção de sedimentos próxima a 100% sob ampla faixa de condições hidrossedimentológicas (Siqueira, 2014; Silva e Rauen, 2017). Contudo, a modelagem 1D mostrou expressiva variação longitudinal no padrão de deposição, com a maior parte dela ocorrendo em uma pequena porção do reservatório, na região situada entre a confluência do rio Passaúna e a ponte da



Ferraria – de extensão e volume aproximados de 1 km e 0,7 hm<sup>3</sup>, respectivamente, valores que correspondem a cerca de 10% e 1% da extensão e do volume do reservatório (Silva e Rauen, 2017). Além disso, Rauen et al. (2016) hipotetizaram que o padrão de transporte de sedimentos em tal região seria influenciado por um confinamento parcial causado pelo estreitamento de seção na ponte da Ferraria, o que seria explicado por uma descontinuidade nos padrões de circulação e transporte entre montante e jusante. Tal confinamento parcial tenderia a aumentar a retenção de sedimentos na região a montante da ponte da Ferraria, que exerceria o efeito de um pré-reservatório, no sentido estudado por Paul e Putz (2008).

O presente estudo decorre da hipótese de Rauen et al. (2016) generalizada para regiões de reservatórios nas quais as características geométricas e hidrossedimentológicas favoreçam um confinamento parcial com aportes sólidos fluviais significativos. Com isso, trabalha-se com a hipótese de que, sob determinadas condições hidrossedimentológicas, tais regiões possam funcionar como pré-reservatórios, ao ampliar a retenção de parte do aporte sólido fluvial relativamente a uma condição em que não ocorresse o confinamento parcial. Esse conhecimento tem potencial de orientar o projeto e o manejo de reservatórios de água quanto a questões que afetam o padrão de assoreamento e controle de sedimentos em tais corpos de água.

## **2 OBJETIVO**

Neste contexto, foi definido que o objetivo do presente estudo é determinar se, e em que condições, o confinamento parcial de uma região de transição rio-reservatório pode exercer efeito similar ao de um pré-reservatório, no sentido de aumentar a retenção localizada do aporte sólido fluvial.

No capítulo 1 e 2, respectivamente, foram apresentadas a problematização e o objetivo do estudo. O capítulo 3 apresenta a Revisão de Literatura que engloba um referencial teórico para este projeto e estudos semelhantes. O capítulo 4 apresenta os procedimentos metodológicos desse estudo. O capítulo 5 contém os resultados e discussão. O capítulo 6 apresenta a conclusão do estudo e recomendações para estudos futuros.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, a seção 2.1 trata da gestão de recursos hídricos com enfoque em questões relativas ao ciclo de sedimentos. A conservação de massa e quantidade de movimento em escoamentos é abordada na seção 2.2. A seção 2.3 trata do transporte de sedimentos, enquanto o tema da seção 2.4 é a modelagem computacional de processos hidrossedimentológicos. A seção 2.5 contém uma apreciação de estudos semelhantes identificados na literatura.

#### 3.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Muitos são os desafios na administração dos conflitos relacionados à água. Nos últimos anos, a ocorrência de cheias e secas em conjunto com a degradação do meio ambiente hídrico e com o aumento da demanda de água causaram um cenário alarmante nos setores de abastecimento e disponibilidade (ANA, 2002) para as companhias de água e energia, referentes ao seu abastecimento e disponibilidade. Meger (2007) afirma que a gestão de recursos hídricos engloba diversos temas relacionados ao ambiente, a economia e a sociedade e que eles demandam do desenvolvimento de um sistema de gerenciamento bem elaborado.

Nesse contexto, a gestão de reservatórios vem se tornando cada vez mais relevante nos setores de água e energia (ANA, 2002). Além de atividades humanas, fatores como as mudanças climáticas e o aumento da demanda por água geram uma diminuição na disponibilidade hídrica para consumo e abastecimento humano, e variações no processo de produção e deposição de sedimentos (DAI; LU, 2010; BOGEN, 2009).

As construções de barragens, além de ocasionar perturbações no meio ambiente, causam interrupções na continuidade do transporte de sedimentos através dos rios. A retenção de sedimentos tem o potencial de reduzir a vida útil e a capacidade de armazenamento dos reservatórios (KONDOLF et al., 2014), além de causar impactos a jusante. A qualidade da água também é afetada pela deposição de matéria orgânica e inorgânica a montante das barragens.

Os sedimentos precipitados são associados aos nutrientes, em especial o fósforo e nitrogênio, que em alta concentração causam proliferação de vegetação e

outros organismos vivos (ESTEVEZ, 1998). O comprometimento do corpo hídrico pode ser ocasionado devido ao manejo inadequado de sedimento, o qual pode acelerar o processo de eutrofização. Por outro lado, o ecossistema pode ser prejudicado a jusante das barragens devido à falta de sedimentos e nutrientes (SCHLEISS et al., 2016). Essas consequências funcionam como pontos de partida para a gestão de sedimentos em bacias com reservatórios, de modo a buscar soluções sustentáveis quanto a questões de projetos de engenharia, economia e ecossistema (COKER et al., 2009).

### 3.2 CONSERVAÇÃO DE MASSA E QUANTIDADE DE MOVIMENTO EM ESCOAMENTOS

O princípio da conservação de massa é um dos principais da natureza, pois a massa, assim como a energia, é uma propriedade conservada e não pode ser criada e nem destruída (FOX et al., 2011). A equação da continuidade expressa tal princípio aplicado ao escoamento de fluidos, podendo ser obtida aplicando o teorema do divergente na equação da conservação de massa. O teorema do divergente, também conhecido como teorema de Gauss permite transformar uma integral de volume de controle do divergente de um vetor em uma integral da área sobre a superfície de controle (ÇENGEL; CIMBALA, 2012). A equação da continuidade pode ser expressa pela Equação (01), que é válida para qualquer ponto no domínio fluido.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (01)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\vec{V}$  é o vetor velocidade  $t$  é o tempo.

As equações de Navier-Stokes (02) permitem determinar os campos de velocidade e pressão em um escoamento, além de estabelecer uma relação entre a quantidade de movimento e a aceleração de elementos fluidos com alterações de pressão e forças viscosas atuantes (FOX et al., 2011). Para um fluido incompressível, a equação de Navier-Stokes é dada por:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} - \vec{\nabla} p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (02)$$

Onde  $\vec{g}$  é a aceleração devido à gravidade,  $p$  é a pressão e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. Para aplicações tridimensionais a equação apresenta valores não

desprezíveis das componentes de velocidade ( $U, V, W$ ) nas três direções do sistema cartesiano ( $x, y, z$ ). Simplificações desse equacionamento mais geral podem ser feitas de acordo com a dimensionalidade do problema a ser simulado, como 1D ou 2D. Mais informações sobre a modelagem 3D realizada neste estudo são fornecidas na seção 3 do presente documento.

Para fluxos turbulentos de interesse na engenharia de recursos hídricos e ambiental, as equações de Navier-Stokes normalmente não possuem solução analítica e não podem ser simplificadas. Para esses casos complexos de solução é necessário a utilização de modelagem de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), com métodos numéricos adequados para a discretização e solução do sistema de equações governantes, inclusive quanto à ocorrência de turbulência no escoamento. De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), existem três estratégias para a modelagem de turbulência:

- RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*): são obtidas por meio de um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes, e fazem parte dessa estratégia os modelos  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  e  $k-l$ , em que  $k$  é a energia cinética turbulenta,  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação de  $k$ ,  $\omega$  é a escala de dissipação de  $k$  e  $l$  é o comprimento de mistura.
- LES (*Large Eddy Simulation*): resolve a turbulência em função do tamanho das escalas turbulentas, requer grande refinamento de malha e grande esforço computacional. A formulação é necessariamente transiente e tridimensional.
- DNS (*Direct Numerical Simulation*): as equações de Navier-Stokes tridimensionais e transientes são resolvidas em malhas muito refinadas, com grande número de elementos, de modo a garantir que todas as escalas turbulentas sejam calculadas sem a utilização de fechamento do sistema de equações para uma representação adequada dos efeitos da turbulência.

### 3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Esta seção contém informações relativas ao transporte de sedimentos, abrangendo as etapas de erosão, transporte e deposição. A modelagem a ser realizada neste estudo tem como foco a deposição em reservatório, por isso

receberá maior atenção.

A erosão é um fenômeno de esfacelamento das rochas e solos e pode ser realizada de duas formas, uma sendo a erosão geomorfológica, em que é processada naturalmente, na qual ocorre o desprendimento das partículas de forma natural; e a outra a erosão antrópica, induzida pelo homem, como por exemplo a agricultura (CARVALHO, 1994). A erosão geomorfológica em conjunto com o transporte e deposição de sedimentos, apresentam uma condição de equilíbrio no meio (COELHO, 2008), e são dominados principalmente por fatores como vazão e natureza das correntes fluviais. Alterações no sistema, como a construção de calhas e de barragens, ocasionam o desequilíbrio dos processos, gerando alterações no fluxo, na carga de sedimentos existentes, no tempo e no espaço.

O movimento dos sedimentos em um curso de água é um fenômeno complexo. Um dos principais critérios existentes para estabelecer as condições de início do movimento é o critério da tensão de cisalhamento (critério de Shields). Baseado na tensão de arrasto, o início do transporte de sedimentos depende de variáveis inter-relacionadas como o parâmetro de Shields,  $\psi$ , Equação (03), e o número de Reynolds de atrito,  $Re_*$ , Equação (04) (HENDERSON, 1966):

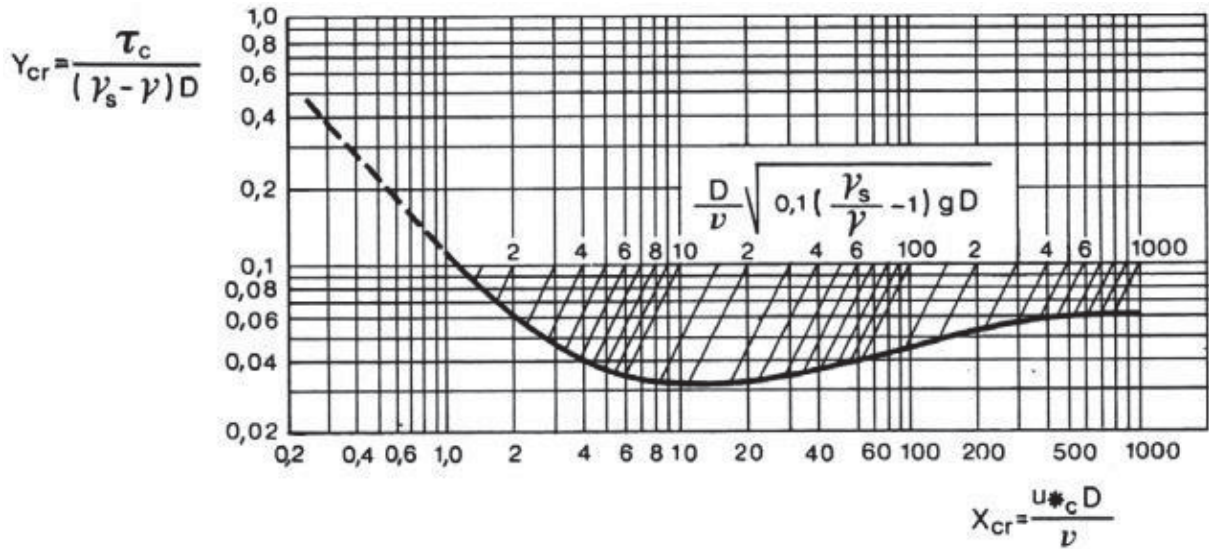
$$\psi = \frac{u_*^2}{(S_s - 1)gd} \quad (03)$$

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad (04)$$

Em que  $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$  é a velocidade de atrito, em que  $\tau$  é a tensão de cisalhamento do leito,  $S_s = \rho_s/\rho$  é a densidade relativa dos grãos de sedimento, no qual  $\rho$  é a massa específica da água e  $\rho_s$  a massa específica do grão,  $g$  é a aceleração devido à gravidade,  $d$  é o diâmetro mediano do sedimento e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido. A tensão de cisalhamento do leito é proporcional ao gradiente de velocidades médias do escoamento e às tensões turbulentas.

O início do transporte de sedimentos é caracterizado pela condição crítica do movimento, dado pela função  $X_{cr} = f(Re_*^{cr})$ , representada graficamente pela FIGURA 1.

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE SHIELDS



FONTE: Adaptado de Graf, 1984

Onde  $Y_{CR}$  é a tensão adimensional crítica (tensão crítica de Shields),  $\tau_c$  a tensão de cisalhamento crítica,  $D$  o diâmetro da partícula,  $\gamma_s$  o peso específico do sedimento,  $\gamma$  o peso específico da água e  $\nu$  a viscosidade cinemática.

A tensão de cisalhamento crítica ( $\tau_{c*}$ ) pode ser obtida pela equação (05) (GRAF, 1984):

$$\tau_{c*} = \frac{D}{\nu} \sqrt{0,1 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D} \quad (05)$$

A região do gráfico localizada acima da curva de Shields na FIGURA 1 corresponde a condições de escoamento em que há movimento do sedimento do leito, enquanto a região localizada abaixo da curva de Shields está relacionada à não-ocorrência de transporte de sedimentos do leito.

O movimento inicial de partículas está ligado à ressuspensão (erosão) de sedimentos do leito. Encontra-se na literatura vários métodos que podem ser empregados para a ressuspensão de sedimentos. Para sedimentos coesivos a ressuspensão pode ser calculada utilizando a abordagem dada por Gailani et al. (1991):

$$E = \frac{\frac{a_0}{T_d^m} \left( \frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right)^n}{3600}, \tau_b > \tau_c; E = 0, \tau_b < \tau_c \quad (06)$$

Em que  $E$  é o potencial de ressuspensão;  $a_0$  é a constante dependente das propriedades do leito;  $T_d$  é o tempo após a deposição;  $\tau_b$  é a tensão de cisalhamento do leito;  $\tau_c$  é a tensão de cisalhamento crítica para erosão; e  $m$ ,  $n$  são as constantes dependentes do ambiente de deposição. A taxa de ressuspensão (eq. 07) é obtida por:

$$E_k = f_k \cdot E \quad (07)$$

Em que  $f_k$  é a fração de sedimento coesivo presente no leito.

Existem dois modos principais de transporte de sedimentos, por carga de fundo e por suspensão. De acordo com Silva e Wilson Júnior (2005), o transporte em suspensão ainda pode ser subdividido em transporte de material originado no trecho analisado, e por carga de lavagem, composto por sedimentos finos (siltes e argilas) providos a montante de uma área de estudo. A principal diferença entre esses dois modos de transporte é sua granulometria, uma vez que o transporte por carga de lavagem possui uma granulometria mais fina em relação ao material do leito (NASCIMENTO, 2001).

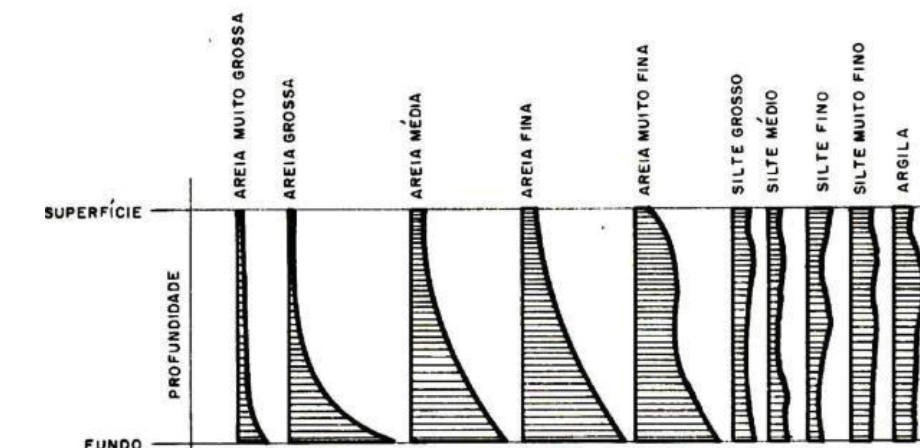
A taxa de transporte de sedimentos depende das características da partícula, como a forma, tamanho, peso e das forças exercidas pelo escoamento (CARVALHO, 1994). Os sedimentos com maior granulometria, como areia e cascalho, devido ao seu peso, são transportados como carga de fundo, por rolamento, deslizamento ou saltação, uma vez que o corpo hídrico não possui energia suficiente para suspensão destas partículas (CARVALHO, 1994).

De acordo com Carvalho (1994) a distribuição dos sedimentos suspensos pode ser avaliada na direção vertical, ao longo do curso de água e lateralmente em uma seção transversal de escoamento fluvial. Em geral, a manutenção de partículas em suspensão é favorecida por maiores velocidades do escoamento e grau de turbulência, enquanto seu próprio peso contribui para a deposição. Desta forma, a concentração de sedimentos suspensos tende a ser menor na superfície do que próximo ao leito, considerando material oriundo do leito local. Os grãos que normalmente se apresentam em suspensão com maiores diâmetros, como a areia, apresentam distribuição crescente da superfície para o leito, conforme mostrado na FIGURA 2. Por outro lado, grãos de silte e argila, que apresentam menores diâmetros, tendem a se apresentar com distribuições praticamente uniformes na direção vertical, caracterizando o transporte por carga de lavagem. A literatura (e.g. GRAF, 1984)



apresenta equações que descrevem perfis verticais da concentração suspensa.

FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÕES VERTICAIS DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS TÍPICAS DE CURSOS DE ÁGUA, EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA DO SEDIMENTO



FONTE: Subcommittee on Sedimentation (1963) Apud Carvalho (1994).

Um parâmetro que pode ser utilizado para estimativa da ocorrência e intensidade do transporte de sedimentos suspensos é o número de Rouse (b) (eq. 08), que relaciona a velocidade de queda ( $W_s$ ), a qual é relacionada ao tamanho representativo da partícula em suspensão, a constante de von Karman ( $\kappa$ ), e a velocidade de atrito ( $u^*$ ).

$$b = \frac{W_s}{\kappa u_*} \quad (08)$$

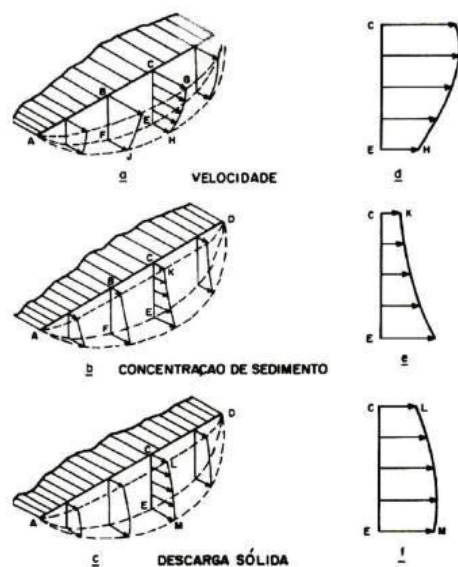
O QUADRO 1 apresenta a faixa de variação para o número de Rouse.

Além de variar da superfície para o fundo, a concentração de sedimentos pode variar lateralmente em uma seção transversal. Em geral, há correlação entre a concentração de sedimentos suspensos oriundos do leito local e a velocidade de escoamento. A FIGURA 3 ilustra que, como nas margens de rios a velocidade de escoamento tende a ser menor, comparada à velocidade no centro da seção, as concentrações de margem também tendem a ser menores. Tal conceito não é diretamente aplicável ao transporte por carga de lavagem.

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DO NÚMERO DE ROUSE

Faixa Variação para b	Característica
$b < 1$	Normalmente ocorre para grãos finos em um fluxo de alta intensidade. Há valores significativos de carga suspensa e o sedimento suspenso está bem misturado na coluna de água.
$1 < b < 2,5$	Início da suspensão. É normalmente encontrado em casos de grãos grosseiros e/ou fluxos de baixa intensidade, onde a descarga sólida suspensa está concentrada na região próxima ao leito.
$b \geq 2,5$	A suspensão não ocorre devido à velocidade de sedimentação (W) ser igual ou maior do que a velocidade de atrito ( $u^*$ )

FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÕES TÍPICAS DA VELOCIDADE, CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS E DESCARGA SÓLIDA EM CURSOS DE ÁGUA



FONTE: Subcommittee on Sedimentation (1963) Apud Carvalho (1994).

A distribuição longitudinal da concentração suspensa em rios pode ser

avaliada em relação à produção de sedimentos. A montante, tendem a ser compostas por sedimentos com granulometria maior que a jusante, devido ao fracionamento se transformando em grãos menores, assim sendo transportado de forma suspensa, bem como à deposição seletiva de material mais grosseiro em regiões de remanso fluvial.

Em modelos numéricos tridimensionais que simulam o transporte de sedimentos suspensos, é comum utilizar a Equação (09) da advecção-difusão para cálculos do campo de concentrações em um domínio computacional, com as condições de contorno típicas apresentadas nas Equações (10) e (11), para a superfície livre e leito, respectivamente (HYDROQUAL, 2002):

$$\frac{\partial C_{ss}}{\partial t} + \frac{\partial UC_{ss}}{\partial x} + \frac{\partial VC_{ss}}{\partial y} + \frac{\partial (W - W_{s,k})C_{ss}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial C_{ss}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial C_{ss}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial C_{ss}}{\partial z} \right) \quad (09)$$

$$K_H \frac{\partial C_{ss}}{\partial z} = 0, z \rightarrow \eta \quad (10)$$

$$K_H \frac{\partial C_{ss}}{\partial z} = E_k - D_k, z \rightarrow -H \quad (11)$$

Em que  $C_{ss}$  é a concentração de sedimentos em suspensão;  $U$ ,  $V$ ,  $W$  são as componentes da velocidade do escoamento nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente;  $A_H$  é o coeficiente de difusividade horizontal;  $K_H$  é o coeficiente difusividade vertical,  $E_k$ ,  $D_k$  são os taxas de resuspensão e de deposição, respectivamente;  $\eta$  é a elevação da superfície da água de um dado especificado; e  $H$  a profundidade batimétrica abaixo do ponto de referência.

De acordo com Carvalho (1994) um dos métodos de estimativa da descarga sólida em suspensão ( $Q_s$ ) é a relação entre a concentração de sedimentos suspensos ( $C_{ss}$ ) e a vazão ( $Q$ ), expressa na equação (12), válida especialmente para a carga de lavagem. Para frações mais grosseiras, que tendem a apresentar perfil não-uniforme de distribuição em uma seção transversal de escoamento, faz-se necessário considerar os perfis verticais e horizontais de concentração e velocidades no cálculo de  $Q_s$ .

$$Q_s = Q \cdot C_{ss} \quad (12)$$

Já a descarga sólida de arrasto ou de fundo pode ser estimada pelas fórmulas de Einstein e Brown, Schoklitsch, Kalinske, Meyer-Peter e Muller, Laursen, Engelund e Hansen, Ackers e White, Yang (CARVALHO, 1994). Ambas as descargas sólidas podem ser obtidas por medição direta e indireta.

A deposição de partículas ocorre quando o escoamento não possui energia suficiente para carregar o material. Os grãos com diâmetros maiores e de material não-coesivo, como areia e cascalho, tendem a se depositar mais rapidamente do que grãos menores, de material coesivo como a argila e o silte.

A natureza coesiva das partículas em suspensão faz com que ocorra formação de flocos que possuem variações de tamanho, ocorrendo variações na concentração e na tensão de cisalhamento interno, afetando as velocidades de deposição (HYDROQUAL, 2002). A deposição é descrita pela Equação (13):

$$D_k = W_s C_{sb} P \quad (13)$$

Em que  $D_k$  é o fluxo de deposição ( $\text{g/cm}^2\text{s}$ );  $W_s$  é a velocidade de sedimentação da partícula ou do floco ( $\text{cm/s}$ );  $C_{sb}$  é a concentração de sedimento coesivo em suspensão próximo ao leito ( $\text{g/cm}^3$ ); e  $P$  é a probabilidade de deposição. Um modelo de floculação pode ser utilizado para estimar  $W_s$  em função de outras grandezas hidrossedimentológicas na modelagem computacional (HYDROQUAL, 2002).

A probabilidade de deposição é afetada por diferentes tamanhos de partículas suspensas ou flocos, bem como pela intensidade do cisalhamento sobre o leito (HYDROQUAL, 2002). Dois métodos usualmente empregados para cálculo desta probabilidade foram desenvolvidos por Krone e por Partheniades. Krone (1962) propôs a Equação 14 para quantificação da probabilidade de deposição :

$$P = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}, \tau_b \leq \tau_d \quad (14)$$

Em que  $\tau_b$  é a tensão de cisalhamento no leito e  $\tau_d$  é a tensão de cisalhamento crítica para deposição. Se  $\tau_b > \tau_d$ , então considera-se  $P = 0$ .

Partheniades (1962) propôs a Equação (15) para cálculo da probabilidade de deposição:

$$P_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Y^2}{2}} (0,4362z - 0,1202z^2 + 0,9373z^3) \quad (15)$$

Onde:

$$z = (1 + 0,3327Y)^{-1} \quad (16)$$

Para:

$$Y < 0, P_1(-Y) = 1 - P_1(Y) \quad (17)$$

### 3.3.1 Deposição de sedimentos em reservatórios

Em geral, a diminuição da velocidade do fluxo tende a reduzir a capacidade de transporte e promover a deposição gradual dos sedimentos em reservatórios. Contudo, trata-se de um processo complexo, influenciado pela granulometria do sedimento, vazão líquida, declividade do leito, geometria da seção, modo de operação do reservatório, descarga sólida afluente, volume de sedimentos já depositados, regime do rio, frequência de inundações, potencial de floculação do aporte sólido e de ocorrência de correntes de densidade (CARVALHO, 1994; GARCIA, 2008).

Devido aos gradientes expressivos dos parâmetros hidráulicos e geométricos, regiões de transição rio-reservatório tendem a reter boa parte do aporte sólido fluvial, especialmente de granulometria maior, como cascalho e areia. Os sedimentos finos, como silte e argila podem ser transportados ao longo do reservatório por meio de plumas (SCHLEISS et al., 2016) e depositados à medida que ocorre a diminuição da energia de transporte, a qual é diretamente proporcional à velocidade do meio (COKER et al., 2009). Vale ressaltar que em um reservatório sem grandes afluentes pode ocorrer uma deposição uniforme ao longo de seu comprimento (MORRIS; FAN, 1998).

Em regiões de transição rio-reservatório, a deposição ocorre normalmente de forma deltaica (MAMIZADEH, 2013). A geometria do canal, em conjunto com a diminuição da velocidade do fluxo e da carga de sedimentos em suspensão influenciam a evolução do delta (WANG et al., 2006; WU et al., 2017). Em geral, a deposição longitudinal em reservatórios é dividida em três regiões principais: região onde ocorre a deposição de sedimentos grossos; região do delta que apresenta aumento na declividade e diminuição da granulometria dos sedimentos; e região onde sedimentos finos se depositam após o delta por correntes de turbidez (MORRIS; FAN, 1998).

Outras classificações de depósitos de sedimentos, além do delta, incluem o

depósito de remanso, formado por granulometria maior, depositados ligeiramente acima do nível máximo do reservatório; e depósitos formados por partículas finas, como silte e argila, que são transportados a jusante dos deltas e depositados no trecho de menor cota batimétrica do reservatório (VANONI, 1977).

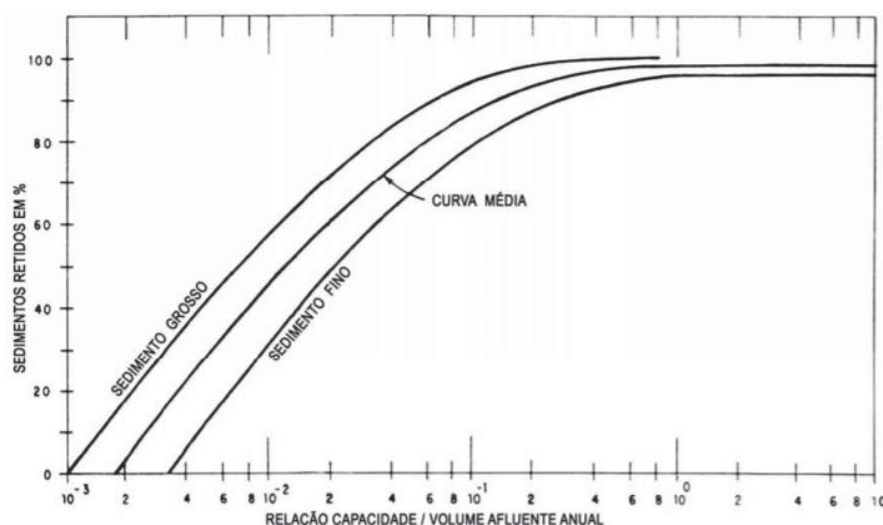
Shaw e Mohrig (2013) ressaltam que a grande maioria das alterações batimétricas em regiões de transição rio-reservatório ocorre durante períodos de alto fluxo fluvial, quando a maioria dos sedimentos chega na região de delta.

Modelos computacionais podem ser utilizados para conferir uma melhor caracterização dos processos hidrossedimentológicos e padrões de deposição em reservatórios, em especial em regiões de confluência e transição rio-reservatório, dada a complexidade dos processos hidrossedimentológicos envolvidos.

Considerando as descargas sólidas afluentes e efluentes de reservatórios ou suas subregiões, é possível determinar a eficiência de retenção de sedimentos (ERS), como a razão entre o aporte sólido retido no reservatório e o aporte total afluente, em um determinado período de tempo (GARCIA, 2008). Tal relação expressa o princípio da conservação da massa de sedimentos, na forma de um balanço de massa.

Outros métodos amplamente utilizados para quantificar as frações de sedimentos retidos em reservatórios de modo indireto são o de Brune e de Churchill. O método de Brune (1953) envolve uma relação entre o volume do reservatório e a vazão afluente para determinar a ERS, conforme mostrado na FIGURA 4.

FIGURA 4 - CURVAS DE EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS, SEGUNDO BRUNE

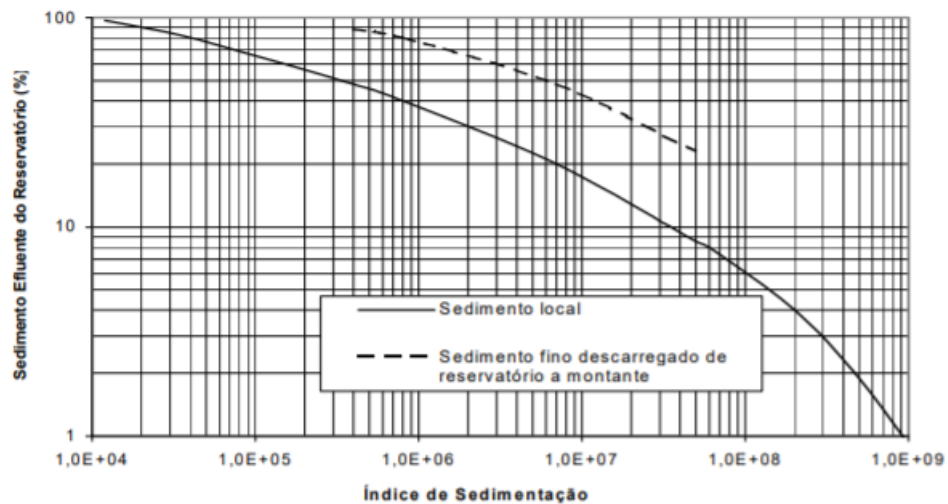


FONTE: Vanoni (1977) Apud Carvalho et al.(2000).

Na FIGURA 4, as curvas inferior e superior correspondem a deposição de sedimentos finos e grossos, respectivamente. Caso não se conheça a granulometria dos sedimentos, utiliza-se a curva média para realização dos cálculos. Observa-se que, com a redução do volume do reservatório, a porcentagem de sedimentos retidos diminui.

O método de Churchill (1948) relaciona o aporte sólido efluente (sedimentos que passam pelo reservatório) ao índice de sedimentação do reservatório, conforme ilustrado na FIGURA 5.

FIGURA 5 - CURVAS DE EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS, SEGUNDO CHURCHILL



FONTE: Carvalho et al., 2000.

O período de retenção corresponde ao volume do reservatório ( $V_{res}$ ) dividido pela vazão média diária ( $Q$ ), e a velocidade média, de acordo com a equação da continuidade, é a vazão média diária dividida pela área da seção transversal, que por sua vez corresponde pela divisão entre o volume do reservatório e seu comprimento ( $L$ ) (eq. 18).

$$IS = \frac{\text{Período de retenção}}{\text{Velocidade média}} = \frac{V_{res}^2}{Q^2 L} \quad (18)$$

Comparando ambos os métodos com a equação de conservação de massa (19), observa-se que para o método de Brune a ERS calculada corresponde ao termo de variação de fluxo de massa total ( $\dot{M}_t$ ). Já para o método de Churchill, o sedimento efluente corresponde ao termo de fluxo de massa de saída ( $\dot{M}_{ss}$ ).

$$\dot{M}_t = \dot{M}_{IN} - \dot{M}_{ss} \quad (19)$$

Carvalho et al. (2000) ressalta que para médios e grandes reservatórios utiliza-se o método de Brune. Para pequenos reservatórios, o método de Churchill é mais adequado. O porte do reservatório é classificado de acordo com a TABELA 1.

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DO PORTE DE RESERVATÓRIOS

Porte	Volume (m³)
Pequeno	<10x10 <sup>6</sup>
Médio	10 a 100 x10 <sup>6</sup>
Grande	>100 x10 <sup>6</sup>

FONTE: Carvalho et al. (2000)

Sabe-se que um grande número de barragens mantém capturado o sedimento dentro de seu corpo hídrico, o que pode levar ao seu assoreamento. Estudos apresentados em Kondolf et al. (2014) mostram várias abordagens de gerenciamento de reservatórios para mitigar o assoreamento causado por sedimentos retidos, assim prolongando a vida útil do reservatório. Algumas dessas abordagens permitem mitigar impactos a jusante, quanto à privação de sedimento nos cursos de água.

### 3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS

Modelos computacionais viabilizam a aplicação de modelos matemáticos para diversas áreas de conhecimento, visando a análise, compreensão e solução de problemas complexos.

O uso de modelos numéricos em simulações hidrossedimentológicas tornou-se viável nas últimas décadas, a partir da implementação de módulos de transporte de sedimentos em modelos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) (HAUN et al., 2013). Os modelos de CFD resolvem equações, como a equação da continuidade e de Navier-Stokes (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2011), que não são facilmente resolvidas analiticamente em problemas de interesse em engenharia (BARROCA, 2012).

Os modelos de CFD possuem interfaces que permitem inserir parâmetros de problemas e examinar seus resultados (MAITELLI, 2010). Os principais elementos para seu funcionamento, de acordo com Versteeg e Malalasekera (2007) são: pré-



processador, módulo principal de solução e pós processador. O pré-processador refere-se à entrada de dados que irão alimentar o problema no modelo, com definições da geometria da região em estudo e malha computacional, das propriedades do fluido e sedimentos e especificação das condições de contorno, por exemplo.

A precisão da modelagem é definida pela quantidade de células na malha, pelo tamanho dessas células e pelo passo de tempo da modelagem interna. A malha computacional define o tamanho e forma dos volumes onde as equações serão empregadas, assim, quanto maior o número de células maior a precisão, e consequentemente maior a demanda de tempo e custo computacional para sua execução (MAITELLI, 2010). O passo de tempo da modelagem, apresentado na seção 2.5.1, é proporcional aos tamanhos das células.

A discretização das equações governantes da hidrodinâmica (especialmente de Navier-Stokes) com suas condições iniciais e de contorno pode ser realizada por meio de diferentes métodos como: método das Diferenças Finitas, o qual utiliza a solução de equações diferenciais parciais (EDPs); método de Elementos Finitos, que executa geometrias complexas, porém sem ferramentas para manipulação dos termos advectivos; e o método de Volumes Finitos, cujas soluções são obtidas por meio de balanços de conservação em um volume de controle. De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007, p.3), a resolução de algoritmos numéricos segue os seguintes passos:

Integração das equações governantes dos volumes de controle de fluido do domínio; Discretização – Conversão das equações integrais de resolução em sistema de equações algébricas; Solução das equações algébricas por um método iterativo.

No passo de pós-processamento os resultados são apresentados e visualizados pelo usuário. Usualmente os pós processadores apresentam opções de visualização que influem traçado de vetores, visualização multidimensional (2D e 3D) da geometria e malha, com possibilidade de manipulação (rotação, translação, etc.), entre outros (MAITELLI, 2010).

Para análises hidrossedimentológicas em reservatórios, há uma gama de modelos com diferentes dimensionalidades, tais como modelos do tipo zero-dimensional (0D), unidimensional (1D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D). Quanto maior a dimensionalidade do modelo maior a capacidade de representação

de variações dos parâmetros hidrossedimentológicos no espaço tridimensional.

Modelos 0D representam processos hidrossedimentológicos de forma espacialmente uniforme, em um dado volume de análise (como um reservatório). Um dos *softwares* 0D mais utilizados no Brasil para cálculo do assoreamento em reservatórios é o SEDIMENT (MENDES, 2005), que utiliza as curvas de Churchill (1948) e Brune (1953) para determinação de retenção de sedimentos, e o método de Lara e Pemberton para estimar a densidade média dos depósitos.

Os modelos 1D usualmente empregados na hidráulica fluvial e para avaliações do assoreamento assumem homogeneidade de parâmetros na seção transversal e calculam variações longitudinais no corpo hídrico. Um dos *softwares* mais relevantes desse tipo é o HEC RAS, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (U.S. Army Corps of Engineers, 2010).

Para simulação de escoamentos considerando variações em duas direções são utilizados modelos 2D, os quais podem ser subdivididos em modelo 2DH – resolução da variação de parâmetros no plano horizontal de modo integrado na direção vertical – e modelo 2DV – resolução da variação de parâmetros no plano vertical-longitudinal com integração na direção lateral. Os modelos 2DH, como o TELEMAC-2D (HERVOUET, 2000), são normalmente aplicados em corpos hídricos pouco estratificados, possuindo homogeneidade na direção vertical ou com perfil de distribuição vertical conhecido para parâmetros de interesse. O modelo numérico TELEMAC-2D resolve as equações de Saint-Venant utilizando o método de elementos finitos ou volumes finitos e uma malha computacional de elementos triangulares (KUMAR; BALAJI, 2015). O *software* simula fluxos de superfície livre em duas dimensões horizontais, sendo que para cada ponto de malha o programa calcula a profundidade da água e duas componentes de velocidade.

Já os modelos 2DV, como o CE-QUAL-W2 (COLE; WELLS, 2008), são capazes de resolver variações verticais, como aquelas causadas por estratificação térmica, e com possibilidade de representação algébrica de distribuições laterais de parâmetros.

Os modelos 3D são capazes de resolver variações em todas as direções, apresentando assim uma maior flexibilidade mediante maior custo computacional e demanda por dados de calibração e validação de seus resultados. Exemplos de modelos 3D de processos hidrossedimentológicos são os *softwares* Delft3D (DELTARES, 2014) e ECOMSED (HYDROQUAL, 2002).

O *software* Delft3D (DELTARES, 2014) apresenta um sistema de modelagem composto por diversos módulos realizando simulações hidrodinâmicas, transporte de sedimentos, ondas, morfologia do leito e qualidade da água. O modelo numérico utiliza sistema de equações de águas rasas em 2D e 3D, derivadas das equações tridimensionais de Navier-Stokes para o fluxo de superfície livre incompressível (ELHAKEEM; et al., 2015). A natureza de águas rasas é utilizada para simplificação do modelo matemático e redução dos gastos computacionais para a solução. É feita a consideração de pressão hidrostática e aproximação de Boussinesq para solução das equações de quantidade de movimento, continuidade e conservação de energia para determinar a distribuição local de variáveis prognósticas (DELTARES, 2014).

O modelo ECOMSED (HYDROQUAL, 2002) é um modelo numérico que simula processos hidrodinâmicos de transporte de sedimentos, ondas e qualidade de água para ambientes de águas rasas. O *software* simula distribuições não-permanentes de níveis de água, correntes, temperatura, teores de salinidade, traçadores, sedimentos coesivos e não-coesivos, e ondas, em corpos hídricos de águas doce e marinha. O modelo também é baseado na consideração de pressão hidrostática e aproximação de Boussinesq, de forma similar ao Delft3D. Como principal característica para representação do domínio se tem um sistema de coordenadas curvilíneas no plano horizontal e coordenada sigma na direção vertical.

### 3.5 ESTUDOS SEMELHANTES

Zhang et al. (2017) utilizaram um modelo numérico unidimensional com superfície livre para simulação do transporte de sedimentos em um reservatório, em especial o processo de deposição em regiões de transição rio-reservatório. Relatou-se a ocorrência de deposição de sedimentos e formação de um delta principalmente onde a seção transversal apresenta um aumento de área. A modelagem mostrou que os fatores hidráulicos como a vazão, nível de água e coeficiente de rugosidade influenciaram o padrão de transporte de sedimentos.

Botelho et al. (2013) simularam a relação entre a velocidade de deposição das partículas e a deposição efetiva sobre um leito com um modelo de transporte de sedimentos em desenvolvimento pelos autores. Foi modelada a entrada de um afluente em um reservatório por meio de um protótipo de dois canais retangulares

ligados por uma zona transicional. Foram simuladas configurações com vazão constante e desconsiderando-se variações de temperatura e salinidade da água, com forçante na superfície livre de tensão de cisalhamento devido aos ventos. Os cálculos da velocidade de sedimentação foram realizados considerando três granulometrias diferentes. Os resultados mostraram tendência à deposição dos sedimentos na região de delta, principalmente se deslocando para as laterais do reservatório, onde as velocidades e tensões de cisalhamento de fundo são inferiores. Os autores ressaltaram que na região central do reservatório ocorreu um grau reduzido de deposição, devido à alta velocidade do escoamento fluvial simulado, ali encontrada, além de uma tendência à deposição de sedimentos mais grosseiros em tal região.

Haun et al. (2013) empregaram o modelo 3D SSIIM para descrição de mudanças do nível do leito morfológico devido à deposição de sedimentos em um protótipo no reservatório hidroelétrico de Angostura (Costa Rica). Os resultados obtidos com o modelo numérico foram comparadas a valores medidos de concentração de sedimento ao longo do reservatório e dos níveis de leito. Os resultados medidos apresentaram pouca divergência em relação aos do modelo numérico, com exceção do transporte simulado de partículas finas iniciando-se mais a jusante do que nas medições. Concluiu-se que o modelo numérico simulou de forma razoavelmente precisa o transporte de sedimentos em suspensão em reservatórios na escala de protótipo.

Chitale et al. (1998) estimaram a taxa de desenvolvimento do delta no reservatório de Indravati por meio de um modelo matemático e dois modelos analíticos, os quais foram comparados. Como modelo matemático empregaram o modelo unidimensional de hidráulica fluvial MIKE11, o qual simulou o posicionamento do delta e a elevação dos níveis de leito devido à deposição de sedimentos. Um segundo perfil do delta foi obtido utilizando o modelo de distribuição de sedimentos de Borland e Miller (1960), que emprega um método empírico de redução da área, o qual depende de fatores como tamanho do sedimento, forma e tipo de operação do reservatório. Este método auxilia na definição de redução da área e capacidade do reservatório em várias elevações do nível de água criados pela deposição de sedimentos. Outro método empregado por Chitale et al. (1998) gerou perfis de delta utilizando procedimento de Strand e Pemberton (1982), baseado na inclinação do topo do delta e da vegetação, além de

um ponto pivô entre as duas margens, na metade do nível de operação do reservatório. Houve concordância entre os resultados obtidos para o perfil deltaico estimado analiticamente e por meio da modelagem computacional. Os autores destacaram a importância dos dados de campo para verificação das previsões de métodos como os utilizados, de modo a gerar perfis deltaicos confiáveis para reservatórios específicos.

Mamizadeh (2013) investigou o processo de formação de deltas em função de parâmetros geométricos e hidrossedimentológicos, tais como a vazão de entrada, descarga sólida de sedimentos, profundidade e ângulo de entrada no reservatório. Foram empregadas análise dimensional e técnica de regressão múltipla para as variáveis independentes (progressão da crista delta) e variáveis dependentes (tempo adimensional, vazão, descarga sólida, profundidade). Foi proposto um modelo combinado para análise da média e do desvio padrão da discrepância para o fundo e a crista do delta. Uma análise de sensibilidade dos resultados mostrou baixa sensibilidade à variação da vazão e da profundidade do escoamento no reservatório, para tais variáveis de resposta.

Kantoush e Schleiss (2014) avaliaram em laboratório o efeito de variáveis geométricas e hidrossedimentológicas de reservatórios de pequenas dimensões sobre sua ERS. Foram simuladas condições de fluxos turbulento subcríticos e totalmente desenvolvidas. Análises dimensional e de regressão foram aplicadas aos resultados, de modo a gerar relações funcionais para descrever a dependência da ERS nos seus principais parâmetros intervenientes. O coeficiente de proporção comprimento/largura apresentou forte influência nos padrões de deposição de sedimentos, sendo que a variável de maior sensibilidade para determinação da ERS foi o comprimento.

Paul e Putz (2008) mediram em campo a retenção de sólidos suspensos em um pré-reservatório durante um cheia, encontrando dependência da ERS em fatores como: grau de enchimento do pré-reservatório, capacidade de armazenamento e intensidade e durações do evento de cheia; modo de operação do pré-reservatório; condições de estratificação no pré-reservatório; e velocidade de sedimentação das partículas. Destacou-se como as regiões confinadas localizadas a montante de reservatórios podem proporcionar um controle do assoreamento e mitigar a passagem de contaminantes agregados ao sedimento.

Omer et al. (2015), por meio de modelagem 2D, identificaram áreas de maior

acúmulo de sedimento dentro do reservatório de Roseires, que apresentava diminuição da capacidade de armazenamento devido ao assoreamento. O reservatório possui 80 km de comprimento e 290 km<sup>2</sup> de área superficial. O modelo utilizado envolveu a equação de advecção-difusão 2D para o transporte de sedimentos, as equações de Krone e Partheniades (seção 2.3.3) para deposição, e o modelo de turbulência k- $\epsilon$  como parte de uma abordagem RANS. A modelagem realizada estimou a deposição de sedimentos no reservatório ocorrendo a jusante do que foi observado em campo. As discrepâncias foram justificadas por uma subestimativa da velocidade de escoamento no reservatório durante altos fluxos, e/ou a uma superestimativa do aporte sólido, uma vez que havia carência por dados medidos para calibração e validação de coeficientes e resultados do modelo.

Kocygit e Falconer (2004) modelaram reservatórios de área superficial de 2 km<sup>2</sup> utilizando um modelo hidrossedimentológico 3D. Foi utilizado o sistema de coordenadas sigma para a direção vertical e uma distribuição hidrostática ou não-hidrostática de pressões. Foram avaliados e comparados reservatórios com diferentes batimetrias quanto ao tipo de abordagem da variação vertical de pressão. Verificou-se que diferentes padrões de circulação foram obtidos devido à influência da batimetria, do coeficiente de viscosidade turbulenta, da intensidade e direção do vento. Ressaltou-se que a aceleração de Coriolis pode ser desconsiderada na simulação hidrodinâmica de corpos hídricos pequenos.

Jin et al. (2000) utilizaram o modelo 3D EFDC para simular a influência dos efeitos de vento e temperatura no padrão de circulação do lago Okeechobee, com 1730 km<sup>2</sup> de área de superfície e 3,0 m de profundidade média. O modelo utiliza a aproximação de Boussinesq, distribuição hidrostática de pressões na direção vertical e abordagem RANS com a viscosidade turbulenta sendo obtida por meio do modelo de turbulência de Mellor e Yamada. O sistema de coordenadas foi o sigma na direção vertical e cartesiano no plano horizontal. Foi analisada a influência do vento e de variações de temperatura sobre os padrões de circulação vertical e mistura no lago. Como condições de contorno foram consideradas as vazões de entrada e saída do lago, temperatura do ar, humidade relativa, radiação de ondas curtas e velocidade do vento. Observou-se que a tensão cisalhante causada pelo vento na superfície livre estava positivamente correlacionada à difusão vertical turbulenta, de modo que, quanto maior a intensidade do vento, maiores os padrões de mistura vertical. A intensidade de circulação vertical diminuiu com o aumento da

profundidade, ao passo que a mistura vertical no corpo hídrico reduziu o grau de estratificação térmica.

Rueda et al. (2006) estudaram a relação entre o tempo médio de permanência do aporte de água fluvial em reservatórios, que está relacionado aos processos de mistura e advecção. Isso possibilita determinar a localização espacial de substâncias dissolvidas e suspensas na água em determinado instante de tempo, além das condições ambientais que influenciam processos biogeoquímicos. Em tal estudo foi utilizado o modelo DYRESM 1D, capaz de simular a estratificação de densidade em lagos e reservatórios e os associados movimentos verticais de massas de água, enquanto as variações horizontais na densidade ocorrem devido à advecção horizontal e convecção. Esse estudo ressaltou a importância dos padrões de transporte e mistura para determinação do tempo de residência de um volume de água dentro de reservatório.

Morillo et al. (2006) mostraram como a circulação hidrodinâmica em lagos pode ser energizada pelo vento, e como o transporte e a deposição de sedimentos são afetados por caminhos de curto-circuito – caminhos preferenciais do fluxo que tendem a transportar substâncias mais rapidamente por regiões do lago. Se essas vias de curto-circuito são interrompidas, ocorre o aumento do tempo de residência da água aumentando a sedimentação das partículas e a diluição das substâncias dissolvidas. Esse estudo avaliou o impacto da manipulação da geometria do lago no transporte de substâncias dissolvidas e partículas suspensas.

Gu et al. (2016) buscaram a otimização de uma lagoa para a remoção de sedimentos considerando fatores como tempo de permanência, vegetação, vento, turbulência, estratificação térmica e configurações de entrada e saída do fluxo. Ressaltaram que um sistema de alta eficiência hidráulica pode ser alcançado por meio de uma geometria adequada, com enfoque na relação comprimento/largura e na profundidade.

Lai et al. (2018) utilizaram um modelo 2D para simular as características da corrente de turbidez e *sluicing* em um reservatório. O *sluicing* gerou interações entre os sedimentos suspensos e do leito por meio da ressuspensão. Os principais parâmetros de influência nesse processo identificados foram o coeficiente de arrasto e a taxa de erosão, cujo aumento favoreceu o aumento da concentração de sedimentos suspensos.

Chao et al. (2008) utilizaram um modelo 3D para simular o transporte de



sedimentos coesivos sob a influência de correntes de ventos em um lago. Observou-se que o transporte e a ressuspensão por recirculação vertical eram induzidas pelo vento. A tensão de cisalhamento crítica no leito foi calculada como a soma das tensões geradas por ondas de superfície e pela corrente.

Ziemińska-Stolarska et al. (2015) utilizaram um modelo 3D para modelar o efeito do vento na circulação horizontal ocorrente em um reservatório. O corpo hídrico foi subdividido em regiões para ser melhor caracterizado. A região de entrada, caracterizada como zona ribeirinha, apresentava as menores profundidades e maiores velocidades. Seguindo para jusante, o reservatório apresentava zonas transitória e lacustre, com velocidades menores devido à maior largura. As simulações mostraram que circulações horizontais ocorreram nas zonas lacustre com redemoinhos de até 500 m de extensão.

Com base na literatura consultada sobre estudos de modelagem computacional hidrossedimentológica em lagos e reservatórios, observou-se que um aumento da ERS correspondente pode ser associado a tempos de residência mais longos (GU et al., 2016; RUEDA et al., 2006) e maiores comprimentos (GU et al., 2016). A relação comprimento/largura é mais um dos parâmetros dominantes sobre a ERS (KANTOUSH; SCHLEISS, 2014; MAMIZADEH, 2013). A vegetação também auxilia na retenção de sedimentos, estando presente no fluxo principal do corpo hídrico (CHITALE et al., 1998; GU et al., 2016). Recirculações envolvendo a direção vertical são comumente causadas pela incidência de ventos, as quais frequentemente aumentam tensões cisalhantes sobre o leito (MORILLO et al., 2006; JIN et al., 2000; MAYERLE et al., 2015). Isso tem um papel importante sobre o transporte de sedimentos suspensos (ZHENG et al., 2014; KOCYGIT; FALCONER, 2004; LI et al., 2010). Recirculações no plano horizontal podem contribuir para aumentar o tempo de retenção no corpo hídrico, de sedimentos e nutrientes, potencialmente aumentando a ERS e afetando a qualidade da água (ZIEMINSKA-STOLARSKA et al., 2015). A vazão fluvial afluente é outro parâmetro predominante no transporte de sedimentos em lagos e reservatórios, especialmente em regiões de transição. Normalmente, quanto maior a vazão, maior a capacidade de transporte de sedimentos e, conseqüentemente, maior a concentração de sedimentos suspensos (CHEN; WANG, 2008; DU et al., 2010; LUO et al., 2013). Normalmente, a deposição de sedimentos ocorre próximo à região de confluência rio-reservatório, devido ao aumento da seção transversal (MAMIZADEH, 2013; KANTOUSH; SCHLEISS, 2014;



ZHANG et al., 2017). Contudo, a velocidade no meio influencia a deposição de sedimentos, de modo que altos fluxos podem ser responsáveis por prorrogar a deposição para locais mais a jusante, especialmente de sedimentos finos (OMER et al., 2015). A estratificação térmica pode afetar a distribuição de velocidades em corpos hídricos, que por sua vez, pode influenciar a distribuição vertical da concentração de sedimentos (QIAO et al., 2011).

Estudos realizados em deltas costeiros e estuários também foram considerados nesta revisão, especialmente quanto ao enfoque de modelagem computacional. Por exemplo, Chen e Wang (2008) utilizaram o modelo ECOMSED para a modelagem do transporte de sedimentos suspensos na região do estuário de Yangtze, na China. Observou-se que o pico de concentração de sedimentos suspensos ocorreu concomitantemente com o pico de corrente de maré, indicando relação de causa e efeito entre as grandezas.

Zheng et al. (2014) empregaram o modelo ECOMSED para o estudo do transporte de uma frente de pluma de sedimentos no estuário do rio Pearl, na China. O modelo foi forçado por ventos, marés e descarga de rios. Foram realizadas 16 simulações com variações de intensidade de vento, direção das marés e descarga dos oito rios da baía. Concluiu-se que os parâmetros com maior influência sobre o deslocamento da frente de pluma foram a intensidade da descarga do rio e a intensidade do vento.

Du et al. (2010) empregaram o modelo ECOMSED, em conjunto ao modelo de onda SWAN, para simulação do transporte de sedimentos coesivos na Baía Hangzhou, sob ondas e correntes marítimas combinadas. Notou-se que o modelo foi capaz de reproduzir as características principais do transporte de sedimentos no estuário, tendo sido obtida equivalência entre os resultados das simulações e dados medidos.

Qiao et al. (2011) modelaram as distribuições horizontal e vertical das concentrações de sedimentos em suspensão utilizando o modelo ECOMSED. Os resultados simulados foram contrastados com dados observados em 312 estações na baía de Bohai, em 2006. Foi analisado o mecanismo de efeito do termoclina na distribuição vertical dos sedimentos suspensos. Junto a esse modelo, vinculou-se um modelo de transporte de sedimentos desenvolvido na universidade de *New South Wales*, o qual supõe que o sedimento é inteiramente composto por partículas não coesivas uniformes. Para simulação, realizou-se um experimento numérico com

termoclina artificial em conjunto com uma temperatura uniforme. Como resultado, na direção horizontal, obtiveram valores de concentrações de massa de sedimentos suspensos elevados na região costeira, enquanto na direção vertical os volumes de concentração de sedimentos suspensos apresentaram duas formas diferentes: o primeiro, com um pico em profundidade de 10 a 15 m e o segundo, sem pico.

Li et al. (2010) simularam numericamente o transporte e a distribuição espaço-temporal da descarga de sedimentos suspensos no rio Amarelo, China, empregando o modelo ECOMSED em conjunto com o modelo de ondas SWAN. Foram realizadas cinco simulações com diferentes fatores hidrodinâmicos para identificação de suas influências no transporte de sedimentos em suspensão. Os resultados indicaram que, pela influência da corrente marítima e do vento, a maior parte do aporte sólido fluvial se depositou fora da região de delta, sendo que uma pequena parte, que não se agregou em flocos, foi transportada por uma maior distância.

Mayerle et al. (2015) empregou o modelo Delft3D para simulação de transporte de sedimentos coesivos e não coesivos devido aos efeitos de corrente marítima e ondas no porto de Paranaguá, Brasil. Para calibração e validação, utilizaram dados de campo coletados em dez estações, referentes à velocidade do fluxo, salinidade e concentração de sedimentos em suspensão. Analisaram a concentração de sedimentos no canal de navegação e sua variação vertical. Notou-se que, para velocidades de vento abaixo de 6 m/s, o efeito das ondas sob as concentrações de sedimentos suspensos e transporte era insignificante.

Luo et al. (2013) estudaram três estuários com diferentes características geológicas e sedimentares próximos à baía de Liverpool, Inglaterra, expostos a um regime semelhante de ondas e marés. Após a calibração do modelo numérico TELEMAC-2D, simularam o transporte de sedimentos para cada estuário, levando em consideração as influências hidrodinâmicas de ondas e condições de maré. Foi expressiva a influência da granulometria dos sedimentos, em especial alterações das frações sedimentares no leito.

Wu et al. (2017) analisaram a evolução morfológica gradual do delta na região do estuário do rio Amarelo, China. Observou-se que a vazão e o aporte sólido fluviais foram fatores dominantes para a evolução do delta, e que a redução da descarga sólida e o aumento da granulometria do sedimento ocasionaram uma maior deposição de sedimentos na região da foz do rio.

As TABELAS 2, 3, 4 e 5 apresentam características e valores de parâmetros

identificados nas modelagens dos estudos descritos nessa seção. Esse levantamento foi considerado na definição das condições da modelagem computacional realizada neste estudo. Uma parte dos estudos listados envolveram corpos hídricos costeiros, como estuários e baías. Outros estudos abordam regiões como reservatórios e lagoas. Alguns dos corpos hídricos possuem dimensões muito maiores do que a região de interesse nesta pesquisa (vide seção 4). Assim, tais estudos foram considerados com o devido discernimento quanto a outros aspectos de interesse nesta pesquisa, que não a escala física do problema estudado.

Com base na TABELA 2, observou-se ser comum o uso de malha computacional com tamanho de células uniforme no plano horizontal. Para os corpos hídricos de porte pequeno similar ao considerado neste estudo, os tamanhos das células no plano horizontal variaram entre 25 m e 2,5 m, com a quantidade de níveis sigma variando entre 20 e 8, para descrição da direção vertical.

Modelos de turbulência e parâmetros de entrada das simulações, como passo de tempo, coeficiente de arrasto hidrodinâmico, coeficientes de mistura vertical e horizontal e coeficiente de rugosidade do leito são apresentados na TABELA 3. Os valores utilizados para esses parâmetros variaram de acordo com as características da malha e condições do escoamento nos corpos hídricos simulados.

A TABELA 4 aponta em quais estudos a estratificação térmica e ocorrência de vento foram incluídas. Os estudos em reservatórios que identificaram efeito expressivo da estratificação térmica sobre os padrões de circulação, em sua maioria, são de corpos hídricos com profundidades superiores a 10 metros. Os estudos apresentados na TABELA 4 mostram que a intensidade do vento variou de 0 m/s a 10 m/s, em diferentes direções ao longo do tempo. Ressalta-se que o valor típico de intensidade do vento nos estudos levantados é de até 5 m/s.

A TABELA 5 apresenta dados sedimentológicos dos estudos consultados nesse levantamento. Os corpos hídricos de porte pequeno foram modelados com transporte suspenso para sedimentos coesivos, exceto Gu et al. (2016). A concentração de sedimentos suspensos variou entre as ordens de 10 mg/L a 100 mg/L e a velocidade de sedimentação de silte em lagos e reservatórios variou entre as ordens de  $10^{-3}$  cm/s a  $10^{-8}$  m/s. Em relação ao modelo de transporte de sedimentos utilizado nas simulações 2D e 3D, para a carga suspensa tipicamente a equação da advecção-difusão é utilizada (Eq. 9). Já para as modelagens que possuem carga de fundo, o modelo de Van Rijn foi empregado.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DAS DAS MALHAS COMPUTACIONAIS IDENTIFICADAS EM ESTUDO SEMELHANTES

Referência	Modelo	Corpo Hídrico	Área Superficial (A <sub>s</sub> )	Dimensões do modelo			Volume Estimado (V <sub>res</sub> )	Número de Células		Tamanho médio célula		Níveis Sigma
				L	B	H (média)		Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	
LAI et al. (2015)	2D	Reservatório	2400m <sup>2</sup>	120m	20m	-	-	445	73	0,26m	0,26m	-
FENG et. al. (2015)	3D	Reservatório	13,25km <sup>2</sup>	5,3 km	5 km	3,4 m	45,1 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	64	60	83m	83m	-
BOTELHO et. al. (2013)	3D	Reservatório	7750m <sup>2</sup>	150m	60m	10m	7,7545 x10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	60	24	2,5m	2,5m	20
KANTOUSH; SCHLEISS (2014)	-	Reservatório	24 m <sup>2</sup>	6m	4m	0,20 m	4,8 m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-
OMER et al. (2015)	2D	Reservatório	290 km <sup>2</sup>	80 km	3,6 km <sup>2</sup>	-	-	534	26	150m	130m	-
ZIEMINSKA-STOLARSKA et al. (2015)	3D	Reservatório	22km <sup>2</sup>	17,1 km	1,5 km	3,3m	72,6 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	106	18	160m	83m	-
MORILLO et al. (2006)	3D	Reservatório	3,3km <sup>2</sup>	4km	1km	34 m	1,65 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	160	40	25m	25m	-
KOCYGIT; FALCONER (2004)	3D	Lago	1,38km <sup>2</sup>	2,3 km	0,6 km	16m	22,1 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	51	21	45m	28,5m	-
JIN et al. (2000)	3D	Lago	1730km <sup>2</sup>	55km	50 km	3m	5190 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	58	66	925m	925m	6
CHAO et. al. (2008)	3D	Lago	0,1 km <sup>2</sup>	1km	100m	1,55m	0,155 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	95	20	10,5 m	5m	8
CHEN;WANG (2008)	3D	Estuário	-	666,72 km	1000,08 km	20m	-	120	180	5,55km	5,55km	11
DU et al. (2010)	3D	Estuário	-	100km	95km	20m	-	160	97	62,5km	98km	10
QIAO et. al. (2011)	3D	Estuário	-	166,68 km	55,56 km	12m	-	90	30	1,85km	1,85km	11
LI et. al. (2013)	3D	Estuário	-	550km	440km	-	-	101	81	5,55km	5,55km	10

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA E CONDIÇÕES DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS IDENTIFICADAS EM ESTUDOS SEMELHANTES

Referência	Corpo Hídrico	Passo de Tempo	Coef. Arrasto Hidrodinâmico	Coef. Mistura Vertical	Coef. Mistura Horizontal	Coef. Rugosidade Leito	Modelo de Turbulência
LAI et al. (2015)	Reservatório	0,1 s	0,065	-	-	-	-
ZIEMINSKA-STOLARSKA et al. (2015)	Reservatório	-	-	-	-	0,5	k- $\omega$
BOTELHO et al. (2013)	Reservatório	-	-	1x10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s	-	-	-
OMER et al. (2015)	Reservatório	30s	-	-	10m <sup>2</sup> /s	-	k- $\epsilon$
CHAO et al. (2008)	Lago	300s	0,001	-	30m <sup>2</sup> /s	-	k- $\epsilon$
KOCYGIT; FALCONER (2004)	Lago	10s	-	-	-	-	-
JIN et al. (2000)	Lago	180s	-	-	-	-	k-l
CHEN;WANG (2008)	Estuário	180s	-	-	-	-	k-l
DU et al. (2010)	Estuário	60 s	-	-	-	-	-
MAYERLE et al. (2015)	Estuário	60s	-	-	1 m <sup>2</sup> /s	-	-
LUO et al. (2013)	Estuário	600s	-	-	-	-	-

TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS QUANTO A ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA E INTENSIDADE DO VENTO IDENTIFICADAS EM ESTUDOS SEMELHANTES

Referência	Corpo hídrico possui estratificação térmica?	Simulações incluem o vento?
ZIEMINSKA-STOLARSKA et al. (2015)	-	Sim 3,0 m/s (médio)
MORILLO et al. (2006)	Sim	Sim -
KOCYGIT; FALCONER (2004)	-	Sim 2,5 a 10 m/s
JIN et al. (2000)	Sim	Sim 4,5 m/s (médio)
CHAO et al. (2008)	-	Sim 4,0 m/s (médio)
LI et al. (2010)	-	Sim -
DU et al. (2010)	-	Sim < 10,0 m/s
MAYERLE et al. (2015)	-	Sim < 6,0 m/s
GU et al. (2016)	Sim	Sim 0,0 - 2,5 – 5,0 m/s
PAUL e PUTZ (2008)	Sim	- -
QIAO et al., 2011	Sim	- -
ZHANG (2017)	-	- -
ZHENG et al. (2014)	Sim	Sim 6,0 m/s (médio)

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS IDENTIFICADAS EM ESTUDOS SEMELHANTES

Referência	Corpo Hídrico	Tipo de Sedimento	Tipo de transporte	Tamanho do grão (m)	Concentração de sedimento suspenso (mg/L)	Velocidade de sedimentação (m/s)	Peso específico sedimento (Kg/m <sup>3</sup> )
LAI; et al. (2015)	Reservatório	Silte	Suspensão	5x10 <sup>-6</sup>	800	4x10 <sup>-5</sup>	-
OMER et al. (2015)	Reservatório	Silte	Suspensão	18,5x10 <sup>-6</sup> ; 22x10 <sup>-6</sup>	24	5x10 <sup>-6</sup>	1200
BOTELHO et. al. (2013)	Reservatório	Silte	Suspensão	0,2x10 <sup>-6</sup> ; 4,1x10 <sup>-6</sup> ; 15x10 <sup>-6</sup>	-	10 <sup>-7</sup>	2650
CHITALE; et al. (1998)	Reservatório	Silte	Suspensão	62x10 <sup>-6</sup>	-	-	-
MAMIZADEH (2013)	Reservatório	Areia	Suspensão	100x10 <sup>-6</sup>	-	-	-
KANTOUSH; SCHLEISS (2014)	Reservatório	Silte	Suspensão	50x10 <sup>-6</sup>	-	6x10 <sup>-8</sup>	1500
PAUL; PUTZ (2008)	Reservatório		Suspensão	-	200	-	-
GU et al. (2016)*	Lagoa	Areia	Suspensão	>100x10 <sup>-6</sup>	-	2x 10 <sup>-7</sup>	1400-1800
CHAO et al. (2008)	Lago	Argila	Suspensão	2,5-3x10 <sup>-6</sup>	20-90	10 <sup>-8</sup>	-
CHEN; WANG (2008)	Estuário	Silte	Suspensão	18-22,5x10 <sup>-6</sup>	10 -300	-	-
DU; et al. (2010)	Estuário	Argila-Silte	Suspensão	75x10 <sup>-6</sup>	200	4x 10 <sup>-7</sup>	2650
LI et. al. (2010)	Estuário	-	Suspensão	-	100	-	-
MAYERLE et al. (2015)	Estuário	Coesivo e Areia	Suspensão e de Fundo	-	220	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-3</sup>	-
LUO et. al. (2013)	Estuário	Areia	Suspensão e de Fundo	160x10 <sup>-6</sup>	-	-	-

## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 4.1 CLASSIFICAÇÃO E ESTRATÉGIA DA PESQUISA

A pesquisa teve abordagem quantitativa e aplicada, ao envolver modelagem de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e do transporte de sedimentos coesivos – processos físicos ocorrendo no espaço tridimensional e com variabilidade temporal, com potencial aplicabilidade para solução de problemas reais (SILVA; MENEZES, 2005; GERHARDT; SILVEIRA, 2009). Quanto ao objetivo, a pesquisa classifica-se como exploratório-descritiva, ao visar identificar a ocorrência de um efeito específico e descrevê-lo em função das características e dos processos nele intervenientes (MARCONI; LAKATOS, 1999) – se uma região de transição rio-reservatório sujeita a um confinamento parcial pode funcionar como um pré-reservatório, quanto ao favorecimento da retenção localizada de sedimentos oriundos do aporte fluvial. A descrição dos resultados obtidos para a eficiência de retenção de sedimentos foi feita com base na variação de parâmetros geométricos e hidrossedimentológicos, para diferentes condições testadas.

Para alcançar o objetivo do estudo, a estratégia de investigação envolveu seis passos metodológicos principais, conforme mostrado no QUADRO 2. O primeiro passo foi a seleção do modelo numérico a ser utilizado e a familiarização da autora com o mesmo, o que incluiu as etapas de estudo do manual e simulação de cenários fictícios. O segundo passo foi a elaboração de cenários para as simulações, que envolveu identificação de parâmetros hidrossedimentológicos potencialmente intervenientes na variável de resposta de interesse na pesquisa – a eficiência de retenção de sedimentos (ERS) em uma região de reservatório. Em seguida, considerando-se as características de um reservatório real, de médio porte, sendo investigado por grupo de pesquisas do qual faz parte o orientador, foram definidas faixas de valores típicos para variáveis de interesse, de modo a delimitar as condições geométricas, hidráulicas e sedimentológicas relevantes para as simulações. O terceiro passo foi a criação de malhas computacionais para representar o domínio fluido de interesse, o que foi feito para cada configuração geométrica definida no passo anterior. As malhas criadas foram, então, testadas quanto à convergência numérica dos resultados, de modo a proporcionar resultados independentes da configuração da malha para variáveis hidrossedimentológicas

selecionadas. O quarto passo envolveu análises de sensibilidade, de conservação de massa e convergência para regime permanente do modelo. No quinto passo foram executadas as simulações computacionais principais do estudo, enquanto o sexto passo envolveu o processamento e a análise dos resultados de modelagem obtidos. Os passos metodológicos são descritos na próxima subseção.

## 4.2 PASSOS METODOLÓGICOS

### 4.2.1 Seleção do modelo computacional

O modelo computacional selecionado para uso nesta pesquisa foi o modelo gratuito ECOMSED versão 1.3 (HYDROQUAL, 2002), o qual tem suas origens na década de 1980, com a criação do *Princeton Ocean Model* (POM), seguido por uma versão atualizada denominada ECOM para ambientes de águas rasas, rios, lagos, estuários e costas oceânicas. Esse modelo é capaz de simular processos hidrodinâmicos no espaço tridimensional em regime transiente, transporte de sedimentos suspensos coesivos e não-coesivos, e o transporte de salinidade e temperatura em ambientes de águas rasas, entre outras habilitações. Ele também simula variações batimétricas, variações de densidade e da descarga sólida devido à erosão e deposição de sedimentos, além de padrões de recirculação nos planos horizontal e vertical – características essenciais para o alcance dos objetivos deste estudo. Outros fatores considerados na seleção do modelo foram o fato que o modelo possui código fonte aberto e seu uso prévio em pesquisa pelo orientador. Salienta-se que o modelo ECOMSED tem longo histórico de utilização e validação em simulações computacionais de corpos de água naturais de águas rasas com transporte de sedimentos coesivos suspensos, conforme mencionado na seção 2.5. Justifica-se ainda a escolha pelo modelo tridimensional, a fim de atingir a hipótese do estudo, a qual relaciona o confinamento parcial com padrões de circulação vertical e horizontal, conforme destacado na seção 1.

A partir da definição do modelo, foi estudado seu manual em conjunto com a realização de simulações de cenários fictícios para familiarização com os arquivos de entrada e saída de dados e forma de execução de simulações, visando alcançar um melhor entendimento e associação de informações, conforme requerido para as



simulações do estudo. A presente descrição do modelo computacional é amplamente baseada em Hydroqual (2002), publicação que pode ser consultada para mais informações.

QUADRO 2 – PASSOS METODOLÓGICOS QUE COMPUSERAM A ESTRATÉGIA DE INVESTIGAÇÃO

Passo Metodológico		Detalhamento
1	Seleção do Modelo Computacional e Familiarização com o mesmo	1.1 Contraste entre as condições da pesquisa e do modelo CFD 1.2 Leitura do manual do usuário 1.3 Realização de simulações com cenários fictícios
2	Elaboração de Cenários de Simulação	2.1 Seleção de parâmetros intervenientes na ERS 2.2 Identificação de valores típicos, definição das geometrias e faixas de variações 2.3 Definição de condições iniciais e de contorno das simulações
3	Criação e Teste de Malhas Computacionais	3.1 Geração de malhas computacionais para as geometrias definidas no passo 2 3.2 Realização de testes de malhas
4	Análises de Sensibilidade, Conservação de Massa no Escoamento e Alcance de Regime Permanente	4.1 Avaliação dos efeitos da variação da velocidade de queda dos sedimentos e da concentração de sedimentos 4.2 Verificação das condições para a conservação de massa no escoamento 4.3 Verificação das condições para o alcance do regime permanente hidrossedimentológico
5	Simulações Principais	5.1 Edição dos arquivos de entrada do modelo computacional de modo a refletir os cenários elaborados no passo 2 5.2 Execução das simulações em micro-computadores <i>desktop</i> 5.3 Conferência dos arquivos de saída quanto aos critérios do passo 4 5.4 Conforme necessário, repetição dos passos 5.1 a 5.3 até a consecução de resultados válidos
6	Processamento e Análise de Resultados	6.1 Tabulação dos resultados das simulações em planilhas eletrônicas 6.2 Cálculos de parâmetros 6.3 Plotagem de gráficos 6.4 Plotagem de campos de velocidade, linhas de corrente e grandezas escalares em programa gráfico 6.5 Análises por blocos de resultados e cruzadas

### Módulo Hidrodinâmico

As equações governantes do módulo hidrodinâmico possuem como variáveis prognósticas a velocidade, temperatura, salinidade, energia cinética de turbulência e a macroescala da turbulência. As aproximações utilizadas pelo modelo são a distribuição hidrostática de pressões e a aproximação de Boussinesq (HYDROQUAL, 2002).

O modelo possui como equações governantes as equações da continuidade e de Navier-Stokes (20) a (22), as quais representam o escoamento por meio dos termos advectivos, difusivos e transientes nas três direções do fluxo.

$$\nabla \cdot \bar{V} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla U + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + F_x \quad (21)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} - fU = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) + F_y \quad (22)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (23)$$

Considerando um sistema cartesiano ortogonal, formado pelo plano xy (eixos longitudinal e lateral) e eixo z (eixo vertical), localiza-se a superfície livre em  $z = \eta(x,y,t)$  e o leito em  $z = -H(x,y)$ . A conservação de massa de massa no escoamento é obtida por meio da Equação (20), a qual possui o divergente de velocidade resultante horizontal ( $\nabla \cdot \bar{V}$ ), calculado a partir das componentes horizontais de velocidade das equações (21) e (22), e gradiente de velocidade na direção vertical ( $\frac{\partial W}{\partial z}$ ).

No plano horizontal são resolvidas as equações diferenciais (21) e (22), que representam a conservação de quantidade de movimento no escoamento. Observa-se em ambas as equações estão presentes o termo transiente em relação às componentes horizontais de velocidades ( $\partial U / \partial t, \partial V / \partial t$ ), termos advectivos ( $\bar{V} \cdot \nabla U, \bar{V} \cdot \nabla V, W \partial U / \partial z, W \partial V / \partial z$ ), parâmetro de Coriolis em relação a velocidade ( $fV, fU$ ), gradiente de pressão em relação às horizontais ( $\partial p / \partial x, \partial p / \partial y$ ) e termo difusivo ( $\frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial U}{\partial z})$ ), sendo  $K_m$  a coeficiente difusividade turbulenta vertical, e termo fonte ( $F_x, F_y$ ). A distribuição de pressões na direção vertical é considerada hidrostática, conforme a equação (23).

“As equações governantes do fechamento da turbulência (eq. 24 e 25) contêm a parametrização de Reynolds para tensão e fluxos, que consideram a

difusão turbulenta de quantidade de movimento” (HYDROQUAL, 2002, pg.9). A parametrização da turbulência utilizada pelo modelo é baseada no trabalho de Mellor e Yamada (1974) e consideram os coeficientes de mistura vertical e difusividade vertical, respectivamente,  $K_m$  e  $K_H$ , como caracterização da turbulência por equações de energia cinética turbulenta  $q^2/2$  e macroescala da turbulência,  $l$ , apresentados a seguir:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + \bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla q^2 + W \frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_q \quad (24)$$

$$\frac{\partial [(q)^2 l]}{\partial t} + \bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla [(q)^2 l] + W \frac{\partial [(q)^2 l]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q \frac{\partial [(q)^2 l]}{\partial z} \right) + l E_1 K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_l \quad (25)$$

Em que

$$\tilde{W} = 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right)^2 \quad (26)$$

$$(L)^{-1} = (\eta - z)^{-1} + (H + Z)^{-1} \quad (27)$$

Os termos  $F_q$  e  $F_l$  estão associados à mistura horizontal e são parametrizados analogamente à temperatura e salinidade.

As condições de contorno na superfície livre,  $z = \eta(x,y)$ , são:

$$\rho_0 K_M \left( \frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z} \right) = (\tau_{ox}, \tau_{oy}) \quad (28)$$

$$\rho_0 K_H \left( \frac{\partial \theta}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = (\dot{H}, \dot{S}) \quad (29)$$

$$q^2 = B_1^{\frac{2}{3}} u_{\tau s}^2 \quad (30)$$

$$q^2 l = 0 \quad (31)$$

$$W = U \frac{\partial \eta}{\partial x} + V \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (32)$$

Sendo  $(\tau_{ox}, \tau_{oy})$  as componentes da tensão superficial causada pelo vento,

$\theta$  temperatura e  $S$  salinidade,  $\dot{H}$  fluxo de calor,  $\dot{S}$  fluxo de salinidade,  $B_1^{\frac{2}{3}}$  é uma constante empírica associada às relações de fechamento de turbulência e  $u_{\tau s}$  a velocidade de atrito causada pelo vento.

Já para o leito do domínio fluido (b), as condições de contorno são:

$$\rho_o K_M \left( \frac{\partial U}{\partial z} \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (33)$$

$$q^2 = B_1^{\frac{2}{3}} u_{\tau b}^2 \quad (34)$$

$$q^2 l = 0 \quad (35)$$

$$W_b = -U_b \frac{\partial H}{\partial x} - V_b \frac{\partial H}{\partial y} \quad (36)$$

Sendo que  $(\tau_{bx}, \tau_{by})$  são as tensões de cisalhamento no leito,  $u_{\tau b}$  é a velocidade de atrito associada à tensão cisalhante no leito, e  $H(x,y)$  a topografia do leito. A tensão no leito é determinada pela lei logarítmica da parede:

$$\vec{\tau}_b = \rho_o C_D |V_b| V_b \quad (37)$$

$$C_D = \left[ \frac{\frac{1}{\kappa} \ln(H + z_b)}{z_0} \right]^{-2} \quad (38)$$

Em que  $z_b$  e  $V_b$  são a altura do primeiro ponto de malha em relação ao leito e a velocidade resultante no plano horizontal em tal ponto, respectivamente;  $\kappa$  é a constante de von Karman;  $C_D$  é o coeficiente de arrasto (igual a 0,0025 neste estudo, conforme recomendado por Hydroqual, 2002). As equações (75) e (76), em conjunto com o fechamento de turbulência derivado de  $K_M$  resultam em:

$$V_b = \left( \frac{\overline{\tau}_b}{\kappa u_{\tau b}} \right) \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (39)$$

O parâmetro  $z_0$  é a altura estimada acima do leito em que a velocidade resultante é zero, valor indicado de 1 cm adotado nas simulações deste estudo (HYDROQUAL, 2002).

As condições de contorno laterais do módulo hidrodinâmico são de fluxo nulo e escorregamento livre em fronteiras sólidas, e especificação de valores de variáveis e/ou gradientes nas regiões de entrada e saída de fluxo no domínio computacional.

A condição de estabilidade do modelo é a de Courant – Friedrichs – Lewy (CFL) (HYDROQUAL, 2002), que condiona o valor máximo do passo de tempo ao espaçamento da malha e propriedades do escoamento. Calcula-se o coeficiente  $C_\tau$  (eq. 41) para cada célula do domínio computacional e, em seguida o passo de tempo ( $\Delta T$ ) definido para as simulações deve obedecer à restrição da equação (40), para

promover a estabilidade da solução numérica.

$$\Delta T \leq \frac{1}{C_T} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-1/2} \quad (40)$$

Em que

$$C_T = 2C + U_{m\acute{a}x} \quad (41)$$

Onde  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são as dimensões horizontais de uma célula da malha,  $C$  é a velocidade máxima gravitacional de onda interna, comumente da ordem de 2 m/s e  $U_{m\acute{a}x}$  a velocidade de advecção máxima.

### *Módulo de Transporte de Sedimentos*

O módulo SED opera em conjunto com o modelo hidrodinâmico quando acionado, utilizando a mesma grade numérica, estrutura e formatos computacionais do modelo hidrodinâmico. A dinâmica dos sedimentos inclui erosão/ressuspensão, transporte e deposição, para sedimentos coesivos e não coesivos. A ressuspensão e deposição dependem do atrito no leito, sendo o fluxo de massa correspondente modelado em função da agregação e do assentamento com possibilidade de uso de resultados experimentais, quando disponíveis. A quantidade de sedimentos coesivos resuspensa é dada pela Equação (11) da seção 2.3.1.

A equação tridimensional (09), da advecção-difusão de solutos é utilizada pelo modelo para simular o transporte de sedimentos suspensos, em conjunto com suas condições de contorno, dada pelas Equações (10) e (11).

No módulo SED, a taxa de deposição dos sedimentos coesivos depende do percentual de sedimentos encontrado próximo ao fundo e da probabilidade de deposição desses sedimentos. Os cálculos são realizados seguindo as abordagens de Krone ou Partheniades, apresentadas na seção 2.3.3. Mais informações a respeito do modelo computacional podem ser obtidas em Hydroqual (2002). O detalhamento de questões relativas à implementação do modelo para simulação de cenários e comportamento dos fluxos no local em estudo é feita em seção posterior.

#### 4.2.2 Região de transição rio-reservatório Passaúna

O estudo está focado em regiões de transição rio-reservatório sujeitas a confinamento parcial causado por um estreitamento de seção, de modo a possibilitar

a investigação dos efeitos de tal confinamento na retenção localizada do aporte sólido fluvial. Adotou-se como referência de escala e de condições geométricas e hidrossedimentológicas a região de transição rio-reservatório Passaúna, caracterizada nesta subseção. Foi aplicada generalização para pré-reservatórios de escala similar.

A bacia hidrográfica do rio Passaúna (FIGURA 6) é uma sub-bacia da bacia do Alto Iguaçu, localizada na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no estado do Paraná. A bacia do Passaúna possui uma área de drenagem de aproximadamente 214 km<sup>2</sup> e altitude média de 850 a 950 metros (DIAS, 1997). A área de drenagem do reservatório do Passaúna é de 156 km<sup>2</sup>, dos quais aproximadamente 9 km<sup>2</sup> são de espelho de água.

A nascente do rio Passaúna se encontra entre as serras de São Luiz do Purunã e Bocaina, e o rio percorre um comprimento de 57 km até desembocar no rio Iguaçu (PITRAT, 2010). Os principais afluentes do rio Passaúna, pela margem direita, são os rios Juriqui, Cachoerinha, Cachoeira, Ferraria e Taquarova. Já pela margem esquerda, o rio não apresenta afluentes significativos. As maiores contribuições de vazões ao reservatório são do rio Passaúna, com 84,4 km<sup>2</sup> de área de drenagem na altura da estação fluviométrica 65021800 (Rio Passaúna BR-277) e rios Cachoeira e Ferraria, com cerca de 10 km<sup>2</sup> de área de drenagem cada um (XAVIER, 2005; SILVA; RAUEN, 2017).

A barragem do Passaúna, localizada no Município de Araucária, a aproximadamente 10 km do Rio Iguaçu, foi construída com o intuito de amplificar o sistema de abastecimento dos municípios da RMC (DIAS, 1997). O reservatório abrange os municípios de Almirante Tamandaré, Curitiba, Araucária, Campo Largo e Campo Magro (XAVIER, 2005), está localizado dentro da Área de Proteção Ambiental do Passaúna – APA Passaúna, a qual possui área de 16.000 ha entre a nascente do rio até sua barragem (IAP, 2017).

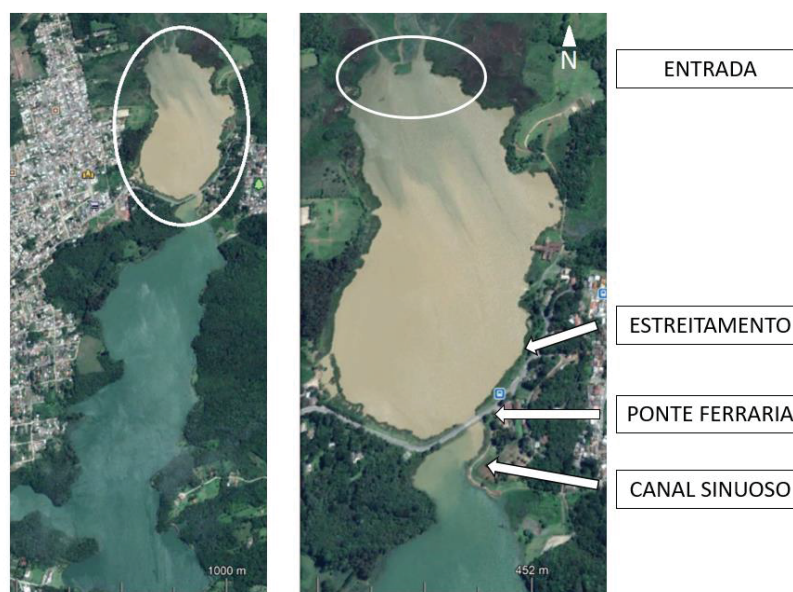




Ferraria), com média de 1,5 m (NICHELE; RAUEN, 2018). O volume de água dessa região de transição foi estimado em aproximadamente 713.000 m<sup>3</sup> (SILVA; RAUEN, 2017), o que representa um valor próximo a 1% da capacidade total do reservatório Passaúna.

Neste estudo, foi verificada a hipótese de que esse estreitamento de seção seguido de canal sinuoso causam, isolada e/ou conjuntamente, um confinamento parcial da região de transição, de modo a conferir, a ela, características similares às de um pré-reservatório no tocante ao favorecimento da retenção do aporte sólido do rio Passaúna. Tal hipótese está fundamentada na noção de que variações geométricas em corpos de água tendem a afetar o padrão de escoamento em seu interior (TEIXEIRA, RAUEN, 2020). No caso em análise, observações e medições de campo (SEWAMA, 2017) sugeriram a ocorrência de uma descontinuidade hidrodinâmica e no padrão de transporte de sedimentos entre as regiões situadas a montante e a jusante da ponte Ferrara, associada a qualquer interrupção do padrão de circulação e transporte, seja no plano horizontal, seja no vertical, ainda que sob determinadas condições hidrossedimentológicas.

FIGURA 7 - REGIÃO DE TRANSIÇÃO RIO-RESERVATÓRIO PASSAÚNA, COM DESTAQUE PARA O ESPELHO DE ÁGUA VISÍVEL EM FOTOS DE SATÉLITE (ADAPTADO DE GOOGLE EARTH, 2020)



A vazão mediana histórica no rio Passaúna é de 1,7 m<sup>3</sup>/s, conforme estimado por Rauen et al. (2017) a partir de dados de monitoramento para a estação

fluviométrica da rodovia BR-277. O mesmo estudo obteve a mediana histórica da concentração de sedimentos suspensos como sendo 58,3 mg/L. Sob tal condição de vazão ou para vazões inferiores, Silva e Rauen (2017) e SEWAMA (2017) observaram que o sedimento suspenso era composto principalmente por silte (~87%) com distribuição uniforme na seção transversal do rio (carga de lavagem), com baixo teor de argila (<6%) e areia (<7%). O leito fluvial correspondente era principalmente arenoso ( $d_{50} \approx 600 \mu\text{m}$ ). No leito da região de transição rio-reservatório, SEWAMA (2017) encontraram predominância de silte ( $d_{50} \approx 30 \mu\text{m}$ ), o que indicou possível padrão de deposição do aporte fluvial suspenso e baixa contribuição relativa do aporte sólido por carga de fundo.

A incidência do vento na superfície de corpos hídricos pode contribuir para a ressuspensão e transporte de sedimentos por meio das recirculações, aceleração e desaceleração do escoamento em regiões específicas. Marcon (2018) realizou um levantamento de dados do vento, extraídos do Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), em Curitiba, para os anos de 2015 a 2016. Na TABELA 6 são apresentados os dados de intensidade do vento, porcentagem de tempo de ocorrência de vento em cada direção e a velocidade média em cada direção. Observou-se que 89,8% das medições indicaram a incidência de velocidades de vento entre 0,1 e 3,6 m/s. A velocidade média de maior intensidade foi de 2,55 m/s, sendo um valor próximo da faixa mais frequente de velocidade ocorrida (1,1-2,2 m/s).

TABELA 6 – MEDIÇÃO DO VENTO NO INTERVALO DE TEMPO DE UM MINUTO NO TECPAR NOS ANOS DE 2015 A 2016. ADAPTADO MARCON (2018)

Velocidade (m/s)	Porcentagem de ocorrência (%)								Total (%)
	N	NL	L	SL	S	SO	O	NO	
0,,1-1,0	5,93	4,16	3,24	1,48	1,41	1,76	1,62	2,36	21,96
1,1-2,2	5,96	8,28	10,83	,381	1,60	2,39	2,55	4,45	39,88
2,3-3,6	2,51	5,33	7,74	3,77	0,70	1,78	1,87	4,26	27,96
3,7-5,2	0,66	0,49	1,46	1,48	0,19	0,58	0,65	2,47	8,28
5,3-7,0	0,11	0,03	0,05	0,18	0,04	0,08	0,10	0,79	1,38
>7,0	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,13	0,19
<b>Total</b>	15,19	18,59	23,33	10,74	3,94	6,61	6,79	14,16	99,65
Velocidade média (m/s)	1,49	1,82	2,03	2,34	1,59	1,93	2,00	2,55	

#### 4.2.3 Cenários idealizados de simulação

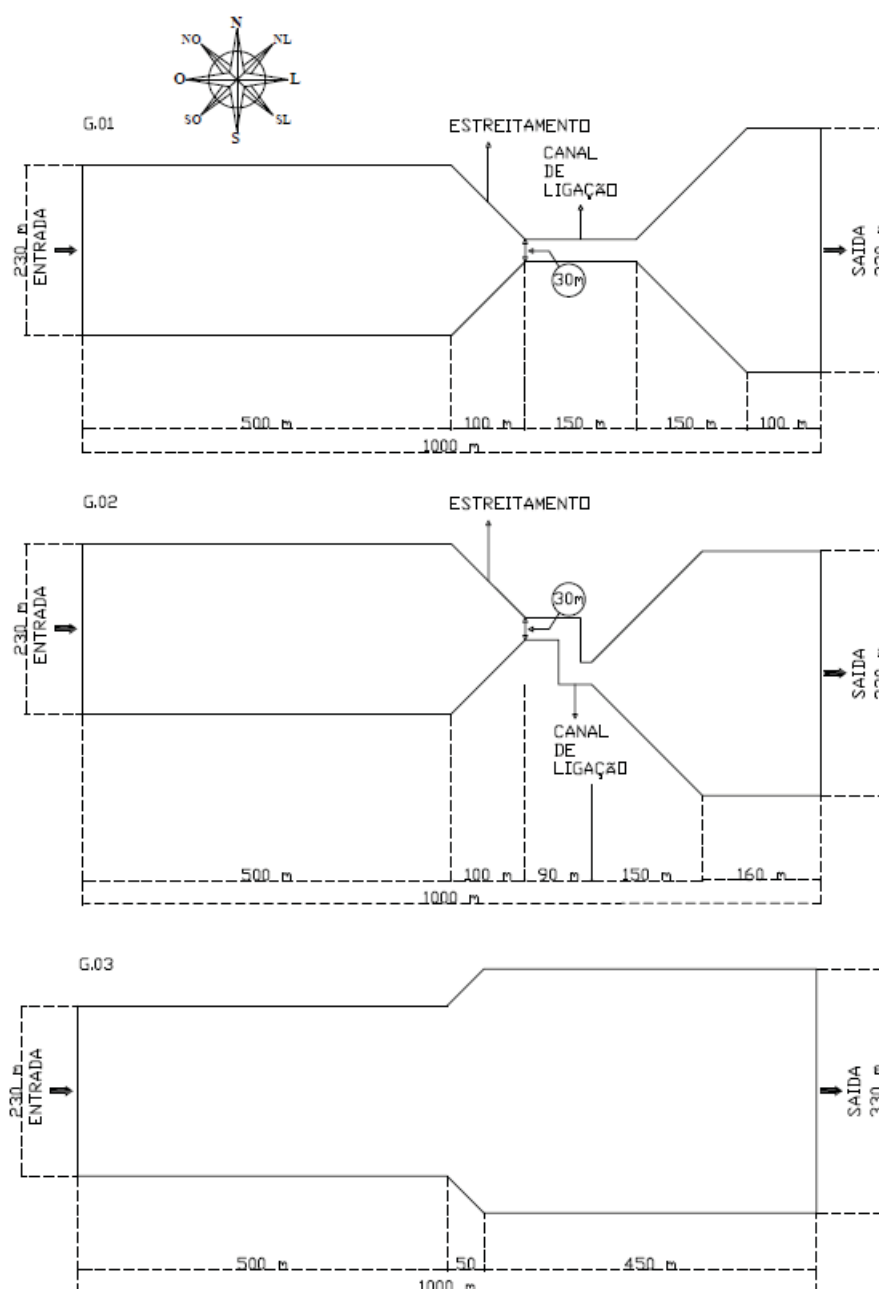
Com base nas características geométricas e hidrossedimentológicas acima descritas, foram definidos valores e faixas de variação para os demais parâmetros de interesse para as simulações computacionais deste estudo. Buscou-se reproduzir a ordem de grandeza de dimensões e valores de parâmetros hidrossedimentológicos, visando conferir certo grau de realismo aos cenários simulados, quanto a sistemas rio-reservatório de porte comparável ao do Passauna. Ao mesmo tempo, prezou-se pela generalização das condições visando favorecer a avaliação do efeito do confinamento parcial sobre o padrão de deposição de sedimentos no interior da região confinada. Para tanto, a largura e a profundidade da seção de entrada do domínio fluido foram uniformizadas para mitigar interferências de outras alterações geométricas, além do confinamento, sobre os processos hidrossedimentológicos de interesse. Também objetivou-se evitar a ocorrência de erosão no interior do domínio fluido, para qualquer condição simulada, de modo que todo transporte de sedimentos simulado estivesse associado ao aporte fluvial e sua deposição.

Foram elaboradas três geometrias para fim de análise da ERS, mostradas na FIGURA 8, sendo que as geometrias G.01 e G.02 apresentavam um estreitamento de seção para um canal de ligação de 30 metros de largura (canal retilíneo e sinuoso, respectivamente) e 150 metros de comprimento. Já para a geometria G.03, as margens foram prolongadas com mesma largura no local do estreitamento de seção das outras geometrias, seguido por um alargamento de seção para representar a conexão com a porção de jusante do reservatório. Na região de transição, todas as geometrias possuem formato prismático, sendo adotados valores de 230 m de largura, 500 m de comprimento e profundidade constante de 4 m (TABELA 7). A redução da largura do corpo hídrico de 230 m para 30 m resultou em uma razão de aproximadamente a 7,67. Na seção de saída, o domínio fluido apresentava largura de 330 m .

TABELA 7 – VALORES DE AS E V PARA AS GEOMETRIAS DIMENSIONADAS

Geometrias	B (m)	L (m)	H (m)	A <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )	V <sub>res</sub> (m <sup>3</sup> )
G.01	230,0	500,0	4,0	115.000	460.000
G.02					
G.03					

FIGURA 8 – CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DIMENSIONADAS PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL



Foi adotada a faixa de vazões de  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , sendo que o limite superior dessa faixa foi considerado como vazão de referência.

Foi avaliada a influência de ventos na direção longitudinal (Oeste-Leste e Leste-Oeste) e oblíqua ao eixo do reservatório (Nordeste-Sudoeste e Sudoeste-Nordeste), com intensidades de  $2,0$  e  $5,0 \text{ m/s}$ . A maior intensidade simulada visou representar situações cuja incidência temporal é relativamente baixa, mas que têm

potencial impacto expressivo sobre o padrão de escoamento no corpo de água simulado. Essas condições são similares às de Gu et al. (2016), conforme reportado na seção 3.5 (TABELA 4). Para as simulações foi desconsiderada a ocorrência de estratificação térmica vertical e horizontal no reservatório

A fim de verificar a influência da concentração de sedimentos suspensos na ERS, foram adotadas faixas de variação idealizadas da concentração inicial no reservatório ( $C_{SI}$ ) e da concentração suspensa do aporte fluvial ( $C_{IN}$ ), conforme mostrado na TABELA 8.

TABELA 8 – FAIXA DE VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS

CSI (mg/L)	$C_{IN}$ (mg/L)
0,0	50,0
10,0	10,0
10,0	50,0
50,0	50,0
0,0	500,0
0,0	1000,0

Outro parâmetro variado nas simulações foi a velocidade de queda ( $W_s$ ) das partículas em suspensão, tendo sido adotados os valores de  $6,6 \times 10^{-5}$  m/s e  $6,6 \times 10^{-6}$  m/s. O valor de  $6,6 \times 10^{-6}$  m/s foi adotado por ser o valor da velocidade de queda mínimo de referência do *software* ECOMSED. Nas simulações preliminares deste estudo observou-se que os valores de  $W_s$  calculados utilizando o modelo de floculação/coagulação de sedimentos coesivos no ECOMSED eram sempre inferiores a  $6,6 \times 10^{-6}$  m/s. Considerando os valores típicos de  $W_s$  para sedimentos suspensos coesivos (TABELA 5), como por exemplo os estudos de Lai et al. (2015) e Omer et al. (2015), também foi adotado o valor de  $W_s$  igual a  $6,6 \times 10^{-5}$  m/s. Nas simulações notou-se que tais valores de  $W_s$  foram uniformes em todo o domínio fluido.

A fim de avaliar os efeitos das variações hidrossedimentológicas e geométricas na ERS, foram simulados 68 cenários com diferentes combinações de valores dos parâmetros de controle. Foram verificados os efeitos das mudanças de geometrias e ventos (TABELA 9), de  $W_s$  (TABELA 10), de  $C_{SI}$  e  $C_{IN}$  (TABELA 11) e da vazão (TABELA 12).

TABELA 9 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS E DE VENTO, PARA MESMAS CONDIÇÕES DE VAZÃO, CSI-C<sub>IN</sub> E W<sub>s</sub>

Simulações	Geometria	Q (m³/s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)
01	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
02	G.01	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
03	G.03	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
04	G.02	3,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
05	G.01	3,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
06	G.03	3,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
07	G.02	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
08	G.01	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
09	G.03	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
10	G.01	3,0	5,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
11	G.02	3,0	5,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
12	G.03	3,0	5,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
13	G.01	3,0	2,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
14	G.02	3,0	2,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
15	G.03	3,0	2,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
16	G.01	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
17	G.02	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
18	G.03	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
19	G.01	3,0	2,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
20	G.02	3,0	2,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
21	G.03	3,0	2,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
22	G.02	3,0	5,0	S-N	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
23	G.02	3,0	5,0	SL-NO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
24	G.02	3,0	5,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>

As simulações computacionais foram executadas com partida a frio, isto é, todas as variáveis hidrossedimentológicas receberam valores iniciais nulos no interior do domínio fluido. As forçantes do escoamento foram implementadas como condições de contorno de vazão (não-nula) na fronteira oeste do domínio e de vento (não-nulo, quando ocorreu) na superfície livre.

Para implementação do modelo, foi calculado o passo de tempo interno ( $\Delta T$ ) para atender à condição de estabilidade CFL. Para essa etapa os valores utilizados para o cálculo foram a vazão de 3,0 m³/s e dimensões da malha horizontal em ambas as direções ( $\Delta x$  e  $\Delta y$ ) de 10 metros. O valor de um passo de tempo calculado para a condição de estabilidade ser atendida foi de 1,776 s, e de modo a atender a Equação (41), foi adotado  $\Delta T$  igual a 1,5 s para execução do modelo. Além disso, o

passo de tempo do modo externo do modelo foi de 0,3 s. Com isso, todas as simulações realizadas foram estáveis.

No início de cada simulação, uma rampa foi aplicada para aumentar gradualmente a vazão na seção de entrada, de zero ao valor especificado. Testes preliminares apontaram que o valor de 300 passos de tempo era adequado e favorecia a convergência dos campos de velocidade média no domínio fluido.

TABELA 10 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES DE  $W_s$ , PARA MESMAS CONDIÇÕES DE VAZÃO, GEOMETRIA, VENTO E  $CSI-C_{IN}$

Simulações	Geometria	Q (m <sup>3</sup> /s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)
25	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
26	G.01	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
27	G.03	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
28	G.02	3,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
29	G.01	3,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
30	G.03	3,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
31	G.02	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
32	G.01	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
33	G.03	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
34	G.01	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
35	G.02	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
36	G.03	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
37	G.01	3,0	5,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
38	G.02	3,0	5,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
39	G.03	3,0	5,0	SO-NL	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>

TABELA 11 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES DE  $CSI$  E  $C_{IN}$ , PARA MESMAS CONDIÇÕES DE VAZÃO, GEOMETRIA, VENTO E  $W_s$

Simulações	Geometria	Q (m <sup>3</sup> /s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)
40	G.02	3,0	5,0	O-L	00-50	6,6x10 <sup>-5</sup>
41	G.02	3,0	5,0	O-L	10-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
42	G.02	3,0	5,0	O-L	10-50	6,6x10 <sup>-5</sup>
43	G.02	3,0	5,0	O-L	50-50	6,6x10 <sup>-5</sup>
44	G.02	3,0	5,0	O-L	00-50	6,6x10 <sup>-6</sup>
45	G.02	3,0	5,0	O-L	10-50	6,6x10 <sup>-6</sup>
46	G.02	3,0	5,0	O-L	00-1000	6,6x10 <sup>-5</sup>
47	G.03	3,0	5,0	O-L	00-1000	6,6x10 <sup>-5</sup>
48	G.02	3,0	5,0	O-L	00-1000	6,6x10 <sup>-6</sup>
49	G.03	3,0	5,0	O-L	00-1000	6,6x10 <sup>-6</sup>
50	G.02	3,0	5,0	O-L	00-500	6,6x10 <sup>-5</sup>



TABELA 12 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO COM VARIAÇÕES DE VAZÃO, PARA MESMAS CONDIÇÕES DE WS, GEOMETRIA, VENTO E CSI-C<sub>IN</sub>

Simulações	Geometria	Q (m³/s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)
51	G.02	1,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
52	G.03	1,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
53	G.01	1,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
54	G.02	1,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
55	G.03	1,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
56	G.01	1,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
57	G.01	1,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
58	G.02	1,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
59	G.03	1,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
60	G.01	0,1	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
61	G.02	0,1	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
62	G.03	0,1	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
63	G.01	0,1	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
64	G.02	0,1	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
65	G.03	0,1	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>
66	G.01	1,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
67	G.02	1,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>
68	G.03	1,0	5,0	L-O	00-10	6,6x10 <sup>-6</sup>

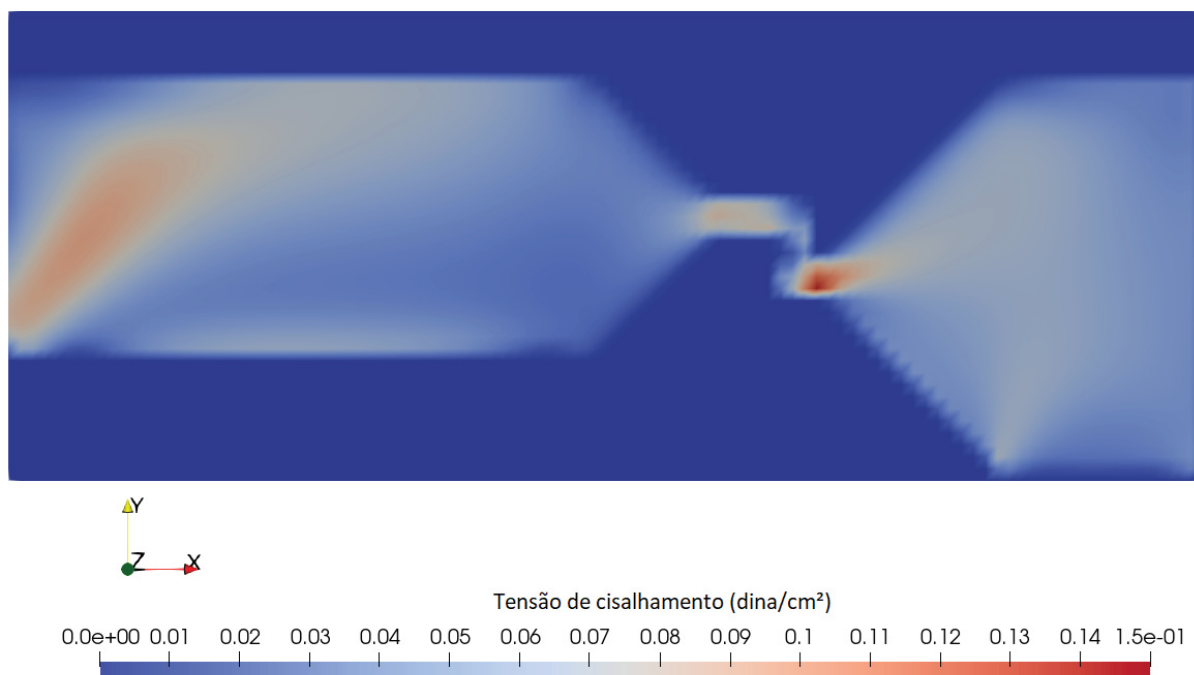
Em estudos semelhantes, valores diferentes foram utilizados para BFRIC, como 0,001 (LAI; HUANG; WU, 2015) e 0,065 (CHAO et al., 2008), e para UMOL, como  $1 \times 10^{-4}$  (BOTELHO et al., 2013). Para as simulações deste estudo optou-se pelos valores recomendados no manual do modelo, mas simulações futuras podem avaliar o efeito da variação de cada coeficiente nos resultados da modelagem.

Outras condições de entrada do modelo estabelecidas foram de temperatura e salinidade constantes e uniformes no domínio fluido e nas condições de contorno, com os valores de 20°C e 0 psu, respectivamente.

Para o módulo do transporte de sedimentos, o cálculo dos fluxos de deposição pelo modelo foi realizado a cada 100 passos de tempo do módulo hidrodinâmico. A equação de Krone foi usada para cálculo da propabilidade de deposição de sedimentos, com a tensão de cisalhamento crítica para deposição de sedimentos coesivos ( $\tau_d$ ) tendo recebido o valor de 1,1 dina/cm<sup>2</sup>, conforme sugerido por Hydroqual (2002). Outros parametros requeridos para o módulo de transporte coesivos foram a densidade aparente do leito coesivo (DENCOH = 1,1 g/cm<sup>3</sup>), coeficiente de atrito ( $C_D = 0,0025$ ) e rugosidade ( $z_0 = 0,01$  m), também seguindo recomendações de Hydroqual (2002).

As condições iniciais do leito não foram alteradas e não exerceram qualquer efeito sobre as simulações deste estudo, dado que não houve erosão na região simulada. O leito foi subdividido em sete camadas, cada qual com espessura de 1 cm e tensão cisalhante crítica de erosão ( $\tau_c$ ) de 100 dina/cm<sup>2</sup> (valor exagerado, empregado desde as simulações preliminares para não ocorrer erosão). Verificou-se que, em todas as simulações deste estudo, a tensão de cisalhamento próxima ao leito na região confinada nunca foi superior a 0,1 dina/cm<sup>2</sup> (conforme exemplificado na FIGURA 9, para a condição mais crítica obtida). Tal valor é pelo menos uma ordem de grandeza inferior aos valores típicos de  $\tau_c$  considerados para leitos coesivos (e.g. Chen et al., 2018; Peixoto et al., 2017), o que confirmou a não-ocorrência de erosão do leito nas condições de simulação deste estudo.

FIGURA 9 - TENSÃO DE CISALHAMENTO NA CAMADA PRÓXIMA AO LEITO, PARA A GEOMETRIA G.02, VAZÃO 3,0 m<sup>3</sup>/s, E VENTO OBLÍQUO V5NLSO.



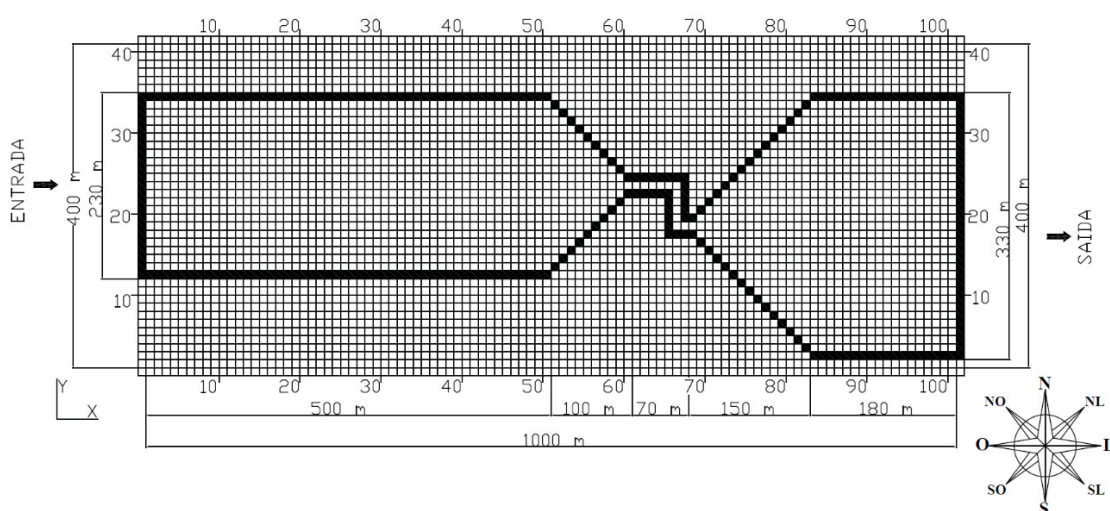
Outras condições de entrada do módulo de transporte de sedimentos foram as concentrações CSI e C<sub>IN</sub>, cujos valores foram informados nas TABELAS 9 a 12.

Salienta-se que as condições de simulação, cenários e geometrias elaboradas descrevem a idealização prevista pelo estudo.

#### 4.2.4 Criação e teste de malhas computacionais

Em busca de uma malha adequada para as simulações computacionais deste estudo, foram criadas duas malhas estruturadas ortogonais no plano horizontal que abrangessem todo o domínio fluido, nos três cenários geométricos. A malha M10 era composta por 4284 células quadradas com dimensões 10x10m, correspondendo a 102 x 42 elementos nas direções longitudinal (x, ao longo do comprimento do corpo de água) e transversal (y, ao longo da largura do corpo de água), respectivamente, a qual é mostrada na FIGURA 10 para a geometria G.02. A malha M05, mais refinada, era composta por 16564 células quadradas com dimensões 5x5m, correspondendo a 202 x 82 elementos nas direções x e y, respectivamente.

FIGURA 10 – ESTRUTURA HORIZONTAL DA MALHA M10 DE DIMENSÕES 10X10m PARA A GEOMETRIA G.02



Na direção vertical, foram avaliadas 17 configurações de níveis sigma (TABELAS 13 e 14) com a malha M10 a fim de obter resultados hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos convergidos quanto à resolução vertical da malha. A representação dos níveis sigma foi realizada por meio de proporção da profundidade, sendo que sigma igual a 0 corresponde à superfície líquida e sigma igual a -1 corresponde ao leito. A malha de referência para esses testes continha 21 níveis sigma, com espaçamentos variando entre 0,5% da profundidade na região próxima ao leito e 10% da profundidade na porção central da coluna de água. A profundidade de escoamento era de 4,0 m. Em busca de uma malha vertical com menor quantidade de níveis sigma e que gerasse resultados equivalentes aos da

simulação com 21 níveis sigma, foram testadas outras 16 configurações de níveis sigma contendo 10, 13, 16 e 19 níveis (TABELAS 12 e 13). A malha M10 foi simulada no cenário G.02 com a vazão de 3,0 m<sup>3</sup>/s, condição de vento de 5,0 m/s na direção oeste-leste, até a obtenção da convergência hidrodinâmica (ver seção seguinte).

TABELA 13 – DISPOSIÇÃO DE NÍVEIS SIGMA NAS CONFIGURAÇÕES DE MALHA VERTICAL DE NÚMEROS 1 A 8

Níveis Sigma	Simulações							
	01	02	03	04	05	06	07	08
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-0.150	-0.080	-0.010	-0.010	-0.010	-0.150	-0.150	-0.100
3	-0.300	-0.170	-0.020	-0.020	-0.020	-0.300	-0.300	-0.200
4	-0.450	-0.250	-0.030	-0.030	-0.030	-0.450	-0.450	-0.300
5	-0.600	-0.340	-0.050	-0.050	-0.050	-0.600	-0.600	-0.400
6	-0.700	-0.420	-0.100	-0.100	-0.100	-0.700	-0.700	-0.500
7	-0.800	-0.500	-0.200	-0.500	-0.250	-0.800	-0.750	-0.600
8	-0.900	-0.590	-0.400	-0.900	-0.400	-0.950	-0.800	-0.700
9	-0.950	-0.670	-0.600	-0.950	-0.600	-0.960	-0.950	-0.800
10	-0.970	-0.760	-0.800	-0.970	-0.750	-0.970	-0.955	-0.950
11	-0.980	-0.840	-0.900	-0.980	-0.900	-0.975	-0.960	-0.960
12	-0.990	-0.920	-0.950	-0.990	-0.950	-0.980	-0.965	-0.970
13	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-0.970	-0.985	-0.970	-0.980
14					-0.980	-0.990	-0.975	-0.990
15					-0.990	-0.995	-0.980	-0.995
16					-1.000	-1.000	-0.985	-1.000
17							-0.990	
18							-0.995	
19							-1.000	
20								
21								

Foram analisados os perfis de velocidade em três estações virtuais de controle localizadas conforme mostrado na FIGURA 10, sendo a estação virtual 01 (E01) situada na porção de montante do corpo de água, no início do estreitamento de seção, nas coordenadas  $x = 500\text{m}$ ,  $y = 225\text{m}$ ; estação virtual 02 (E02) situada no início do canal de ligação, nas coordenadas  $x = 600\text{ m}$ ,  $y = 225\text{ m}$ ; e a estação virtual 03 (E03) situada na porção de jusante do corpo de água, no final do alargamento de seção após o canal de ligação, nas coordenadas  $x = 850\text{ m}$ ,  $y = 175\text{ m}$ . Para a análise, foram extraídos os dados de velocidades U, V e W em relação à profundidade (eixo z) e criados gráficos de perfis de velocidades. As FIGURAS 11, 12 e 13 mostram os perfis de velocidade resultante, calculadas com as componentes

horizontais U e V, nas estações virtuais E01, E02 e E03. Em determinadas condições o perfil vertical de velocidade apresenta velocidades negativas, o que indica que há escoamento no sentido contrário em que o vento está soprando (FIGURAS 12 e 14).

TABELA 14 – DISPOSIÇÃO DE NÍVEIS SIGMA NAS CONFIGURAÇÕES DE MALHA VERTICAL DE NÚMEROS 9 A 17

Níveis Sigma	Simulações								
	09	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-0.100	-0.150	-0.150	-0.150	-0.150	-0.200	-0.050	-0.100	-0.050
3	-0.200	-0.300	-0.300	-0.300	-0.300	-0.400	-0.100	-0.200	-0.100
4	-0.300	-0.450	-0.450	-0.450	-0.400	-0.600	-0.300	-0.300	-0.150
5	-0.450	-0.500	-0.500	-0.500	-0.500	-0.900	-0.500	-0.400	-0.200
6	-0.500	-0.550	-0.550	-0.550	-0.600	-0.950	-0.700	-0.600	-0.250
7	-0.550	-0.600	-0.600	-0.600	-0.700	-0.970	-0.900	-0.700	-0.300
8	-0.600	-0.650	-0.650	-0.650	-0.800	-0.980	-0.950	-0.800	-0.400
9	-0.650	-0.700	-0.700	-0.700	-0.850	-0.990	-0.980	-0.900	-0.500
10	-0.700	-0.800	-0.750	-0.750	-0.900	-1.000	-1.000	-0.940	-0.600
11	-0.800	-0.850	-0.800	-0.800	-0.920			-0.960	-0.700
12	-0.900	-0.900	-0.850	-0.850	-0.950			-0.980	-0.800
13	-0.950	-0.950	-0.900	-0.900	-0.970			-1.000	-0.850
14	-0.960	-0.960	-0.920	-0.945	-0.990				-9.000
15	-0.970	-0.970	-0.950	-0.960	-0.995				-0.930
16	-0.980	-0.980	-0.970	-0.975	-1.000				-0.950
17	-0.990	-0.990	-0.990	-0.990					-0.970
18	-0.995	-0.995	-0.995	-0.995					-0.980
19	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000					-0.990
20									-0.995
21									-1.000

FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES VIRTUAIS DE ANÁLISE DE RESULTADOS PARA O TESTE DE MALHAS

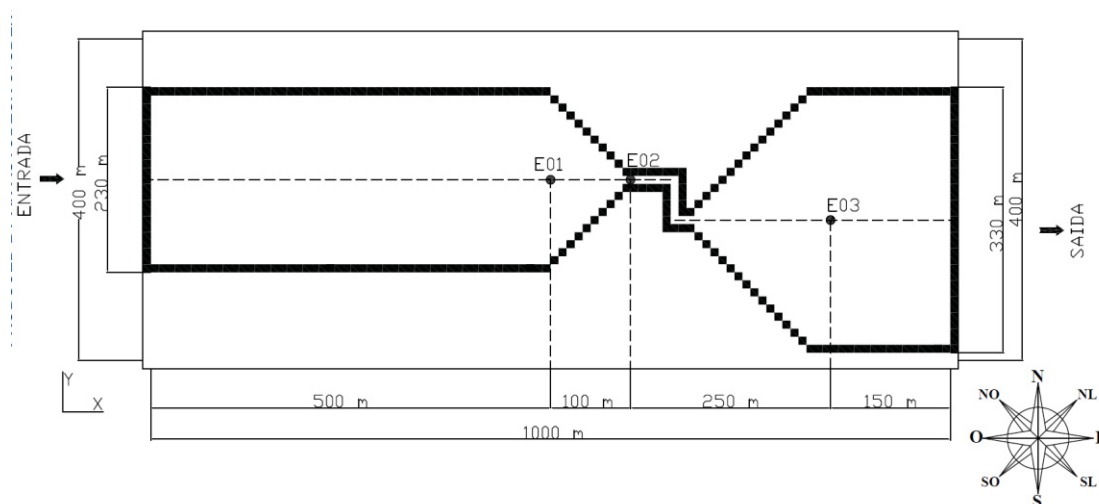


FIGURA 12 – PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE RESULTANTE HORIZONTAL, NA ESTAÇÃO E01

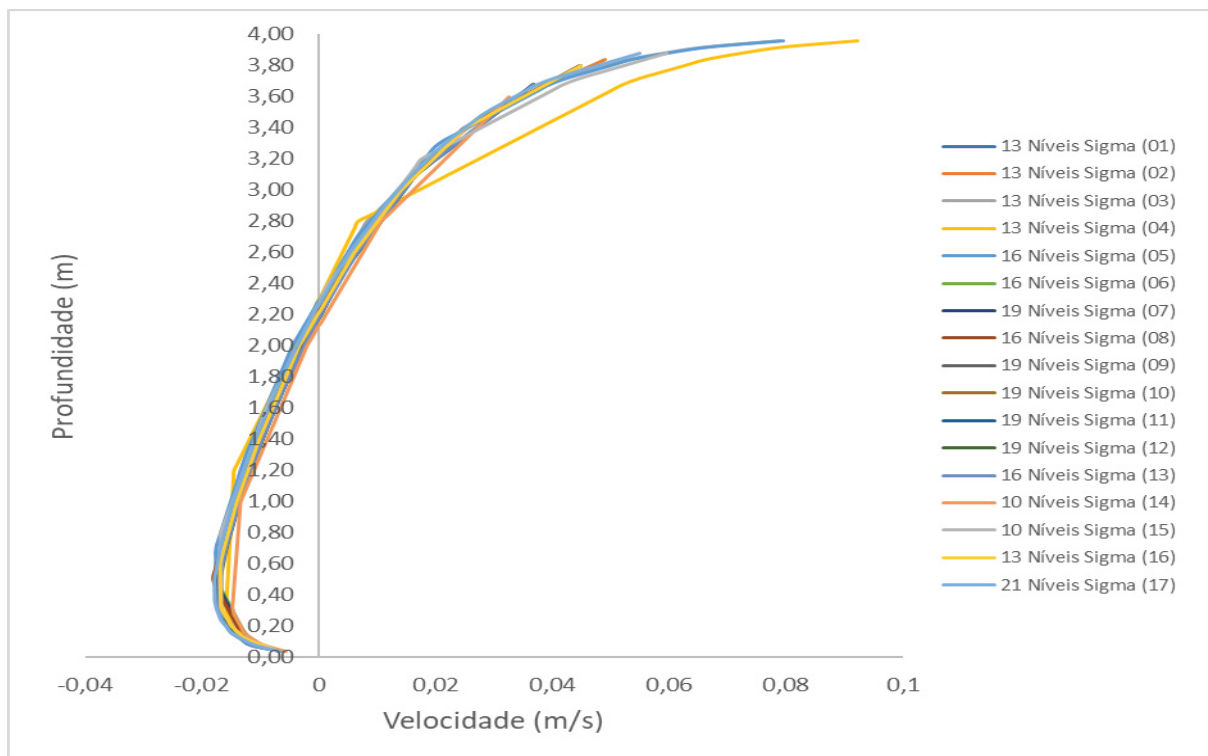


FIGURA 13 - PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE RESULTANTE HORIZONTAL, NA ESTAÇÃO E02

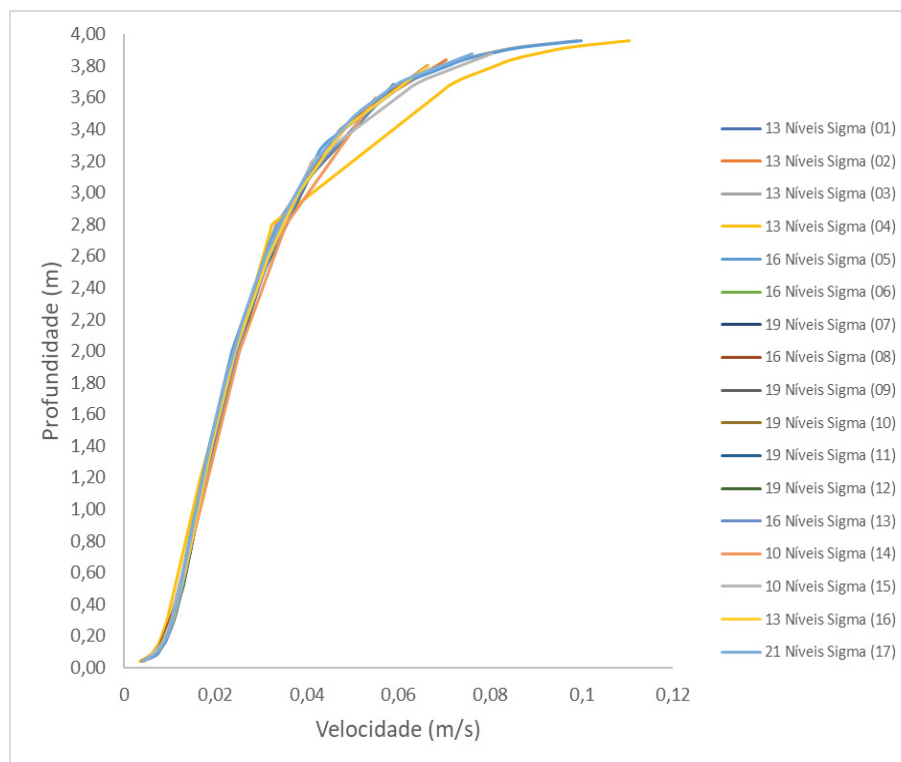
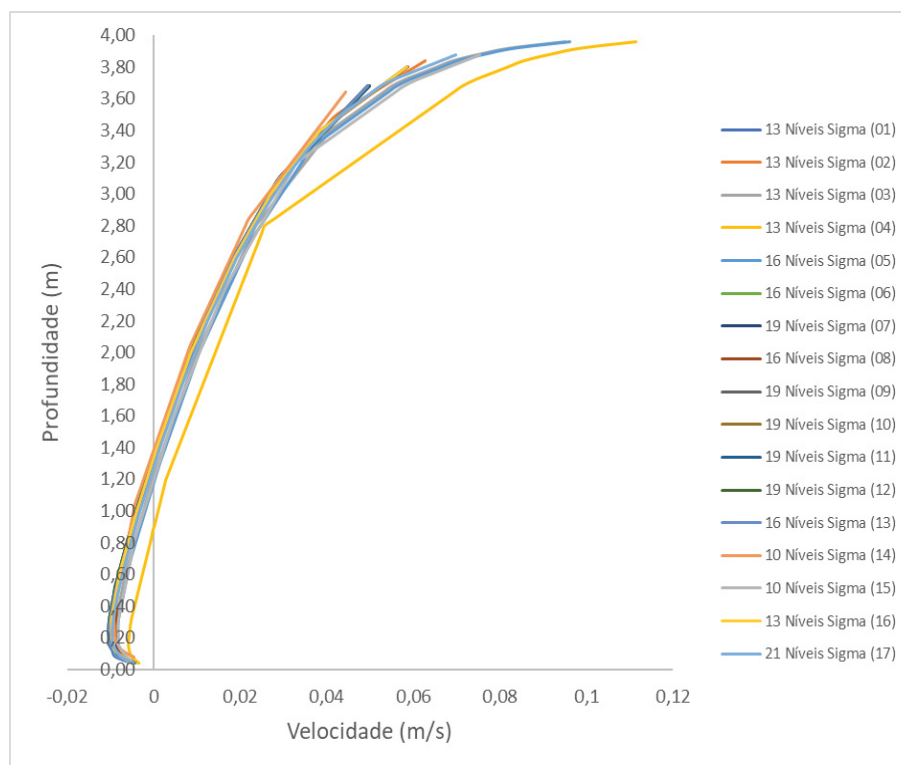


FIGURA 14 – PERFIS VERTICAIS DE VELOCIDADE RESULTANTE HORIZONTAL, NA ESTAÇÃO E03



Nas FIGURAS 12 a 14, na região próxima à superfície livre, observa-se que as malhas diferiram em relação à velocidade máxima estimada em diferentes alturas em relação ao leito. Isso ocorreu devido ao nível de detalhamento da malha nas proximidades da superfície livre, especialmente a localização do primeiro nível sigma: quanto mais próximo à superfície, maior foi a velocidade, pois o principal parâmetro que intensifica a velocidade próximo à superfície é a existência de vento no sentido longitudinal do escoamento. Um padrão similar ocorreu na região próxima ao leito, sendo que entre as alturas zero e 0,4 m em relação ao leito houve uma pequena divergência de resultados: quanto menor a altura do primeiro ponto de malha, menor a velocidade nele calculada.

Notou-se que os perfis de velocidade de todas as malhas, exceto a 04 (FIGURAS 12 a 14), seguiram a mesma tendência de variação. A convergência dos perfis de velocidade resultante ocorreu na altura de 3,6 m em relação ao leito, ou seja, a 10% da profundidade total a partir da superfície. Para a região situada entre zero e 3,6 metros de altura em relação ao leito, foi calculado o desvio relativo (%) entre a velocidade resultante a dada altura, de cada malha em relação à velocidade correspondente na malha de referência (com 21 níveis sigma). Conforme necessário



para gerar valores de velocidade em uma mesma profundidade para cada malha, os resultados simulados foram interpolados linearmente entre os dois níveis sigma adjacentes. A partir de tais desvios relativos foram calculados os desvios médio e mediano para cada malha e cada estação (FIGURAS 15, 16 e 17), conforme mostrado na TABELA 15. Para a componente vertical de velocidade (W) foi realizada uma análise similar e obtidos os resultados mostrados na TABELA 16.

FIGURA 15 – PARAMETRO DE DESVIO REFERENTE AO PERFIL DE VELOCIDADE RESULTANTE DA ESTAÇÃO E01

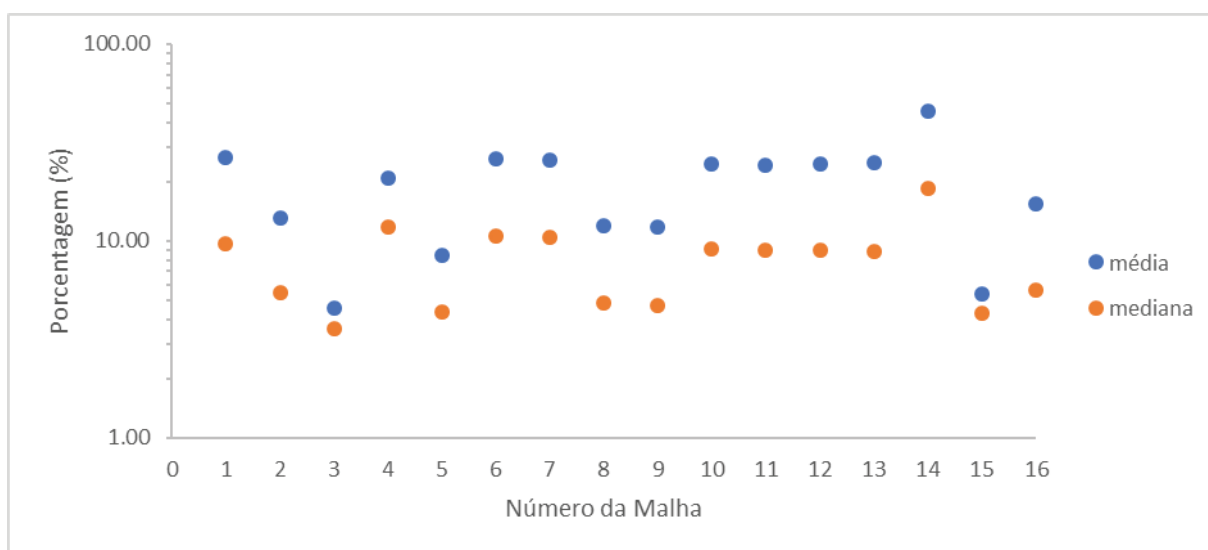


FIGURA 16 - PARAMETRO DE DESVIO REFERENTE AO PERFIL DE VELOCIDADE RESULTANTE DA ESTAÇÃO E02

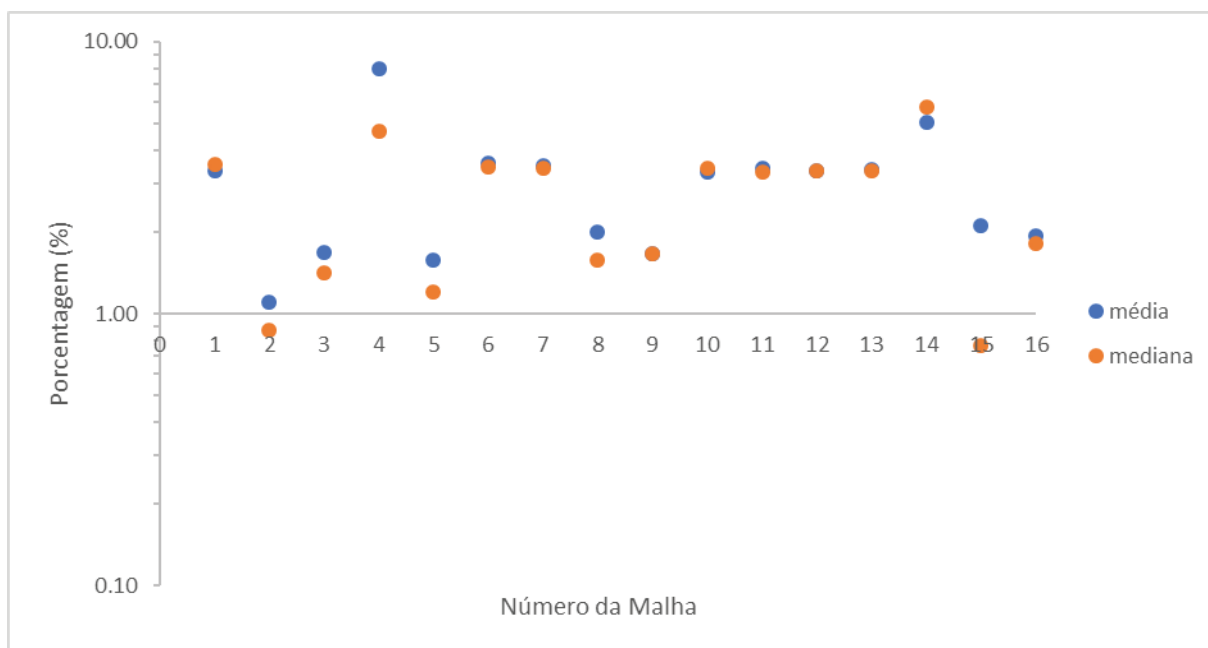


FIGURA 17 - PARAMETRO DE DESVIO REFERENTE AO PEFIL DE VELOCIDADE RESULTANTE DA ESTAÇÃO E03

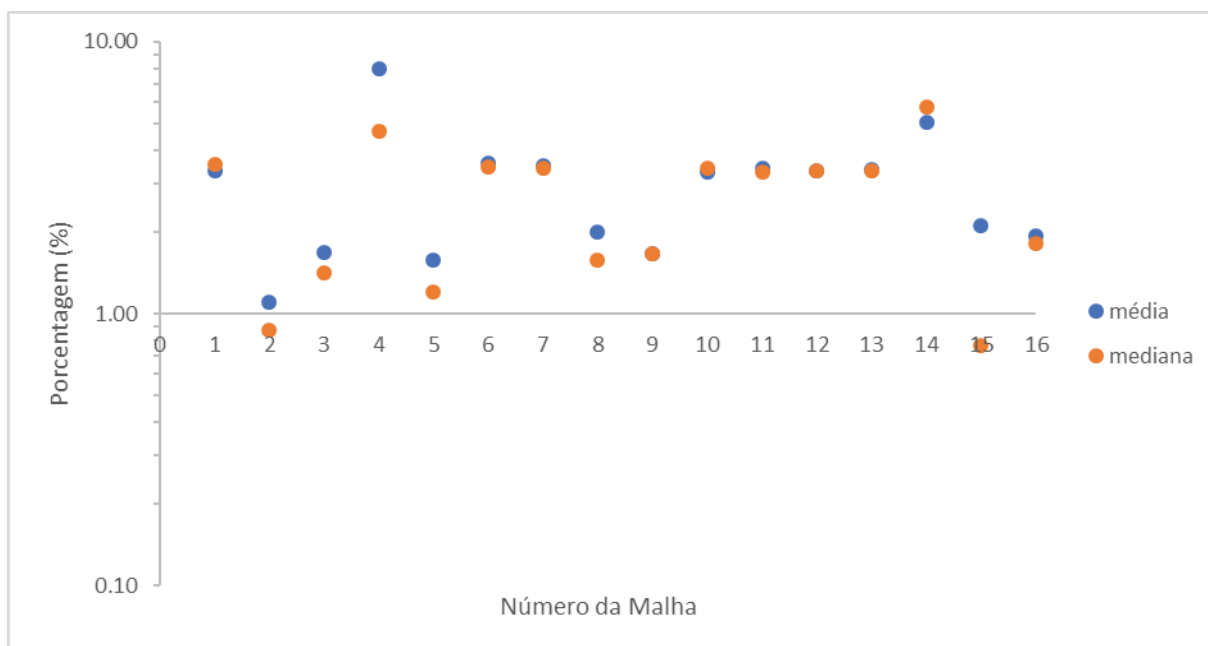


TABELA 15 - MÉDIA E MEDIANA DO PARAMETRO DE DESVIO NOS PERFIS DE VELOCIDADE RESULTANTE, PARA CADA MALHA

Simulação	E01		E02		E03	
	Média (%)	Mediana (%)	Média (%)	Mediana (%)	Média (%)	Mediana (%)
01	26,62	9,71	3,35	3,53	44,22	6,85
02	13,03	5,43	1,10	0,87	34,43	6,35
03	4,57	3,58	1,69	1,42	38,16	8,19
04	20,75	11,85	7,99	4,71	190,90	43,33
05	8,44	4,36	1,58	1,21	54,21	11,76
06	26,07	10,56	3,59	3,47	30,98	6,03
07	28,91	10,44	3,50	3,43	31,89	5,92
08	12,00	4,87	1,99	1,57	9,47	1,94
09	11,71	4,67	1,67	1,66	23,01	3,82
10	24,75	9,09	3,32	3,44	45,14	8,32
11	24,38	8,93	3,42	3,32	38,98	8,21
12	24,49	9,00	3,35	3,36	43,21	8,39
13	24,94	8,80	3,38	3,37	37,99	8,05
14	45,48	18,49	5,03	5,74	61,42	9,08
15	5,35	4,26	2,10	0,76	40,27	11,28
16	15,51	5,63	1,93	1,80	29,16	3,98

TABELA 16 – MÉDIA E MEDIANA DO PARAMETRO DE DESVIO NOS PERFIS VERTICAIS DA COMPONENTE DE VELOCIDADE W, PARA CADA MALHA M10

Simulação	E01		E02		E03	
	Média (%)	Mediana (%)	Média (%)	Mediana (%)	Média (%)	Mediana (%)
01	13,89	6,37	13,44	6,08	27,21	22,42
02	14,46	8,67	9,72	2,26	18,67	10,18
03	18,04	10,71	16,92	10,21	26,55	12,85
04	32,87	26,15	31,35	26,46	44,32	48,56
05	16,10	8,47	14,48	6,07	18,45	11,22
06	14,09	6,30	15,09	7,43	27,14	21,76
07	13,97	5,03	15,40	7,53	27,96	23,85
08	11,47	4,56	10,02	3,85	13,45	8,86
09	8,76	4,63	9,01	5,42	14,50	11,06
10	12,70	4,75	11,81	2,59	28,00	21,97
11	12,51	3,47	12,29	3,35	27,39	21,17
12	12,66	4,89	12,00	359	27,69	21,92
13	11,18	1,11	10,88	0,81	26,24	19,87
14	16,82	9,73	17,60	9,00	31,84	28,65
15	14,10	7,95	14,35	9,41	17,47	12,15
16	11,67	7,47	9,85	5,76	17,77	12,40

Analizando as medianas dos desvios obtidos para as três estações, notou-se que as malhas 02, 08, 09 e 16 apresentaram os menores valores, o que foi interpretado como indicando sua convergência e suficiência quanto à resolução vertical da malha, para as estações e velocidades envolvidas nesta análise (consideradas representativas de diferentes condições de escoamento no domínio fluido).

O teste de malhas para a direção vertical foi ampliado, com as quatro malhas pré-selecionadas acima, para incluir o transporte de sedimentos. Foram simuladas as mesmas condições hidrodinâmicas anteriormente descritas, com o transporte de sedimentos tendo os parâmetros de entrada: concentração de sedimentos coesivos dentro do reservatório (CSI) de 0 mg/L; concentração constante de sedimentos no escoamento de entrada no reservatório ( $C_{IN}$ ) de 10 mg/L; e velocidade de queda das partículas ( $W_s$ ) de  $6,6 \times 10^{-5}$  m/s. Essas simulações foram realizadas por três dias de tempo computacional, para possibilitar o alcance de estado estacionário nas distribuições de tensão de cisalhamento no escoamento e da concentração de sedimentos no corpo de água. A análise de resultados envolveu os perfis verticais da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e da concentração de sedimentos ( $C_{ss}$ ) para cada estação (E01, E02 e E03). De forma similar ao teste de malha hidrodinâmico, foram comparados os perfis de  $\tau$  (FIGURAS 18, 19 e 20) e  $C_{ss}$  (FIGURAS 21, 22 e 23) das malhas 02, 08, 09 e 16 em relação à simulação 17, e calculados os valores

médio e mediano do desvio relativo (%) (FIGURAS 24, 25 e 26). Em seguida, foram calculados os valores da Eficiência de Retenção de Sedimentos (ERS) na porção de montante do corpo de água, que correspondeu à seção transversal ao escoamento alinhada com a estação E01. Os resultados obtidos são mostrados na TABELA 17.

Observa-se que, para cada estação virtual, houve pequenas variações das medianas de cada parâmetro comparados com a simulação vertical de 21 níveis sigma, o que foi interpretado como indicativo de que as quatro malhas testadas nesta etapa apresentaram resultados equivalentes. Com isso, visando economizar tempo computacional nas simulações realizadas neste estudo, optou-se pela malha vertical da simulação 16, a qual possui 13 níveis sigma.

O teste de malhas para o plano horizontal foi realizado com a distribuição de 13 níveis sigma na direção vertical, para as mesmas condições hidrossedimentológicas descritas acima. O resultado da ERS obtido com a malha M05, com dimensões de célula de 5x5m, foi de 84,0%, variando apenas 0,6% em relação ao resultado correspondente da malha M10 de 10x10m. Foram realizadas outras duas simulações com a malha de dimensões 5x5m e 13 níveis sigma, nas condições mostradas na TABELA 18.

FIGURA 18 - PERFIS VERTICAIS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA ESTAÇÃO E01

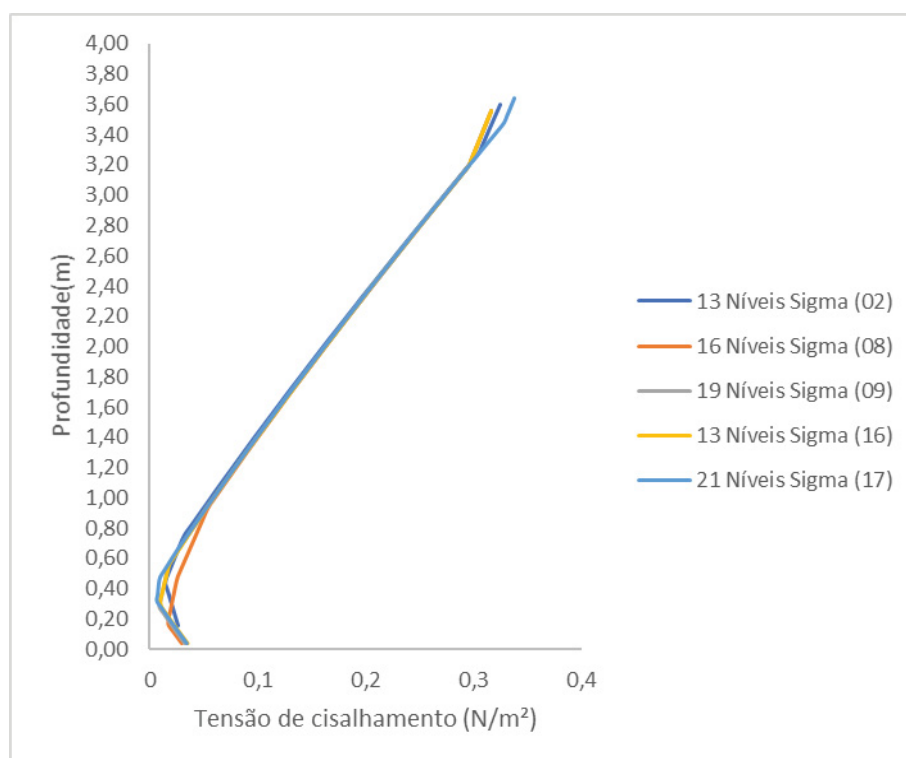


FIGURA 19 – PERFIS VERTICAIS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA ESTAÇÃO E02

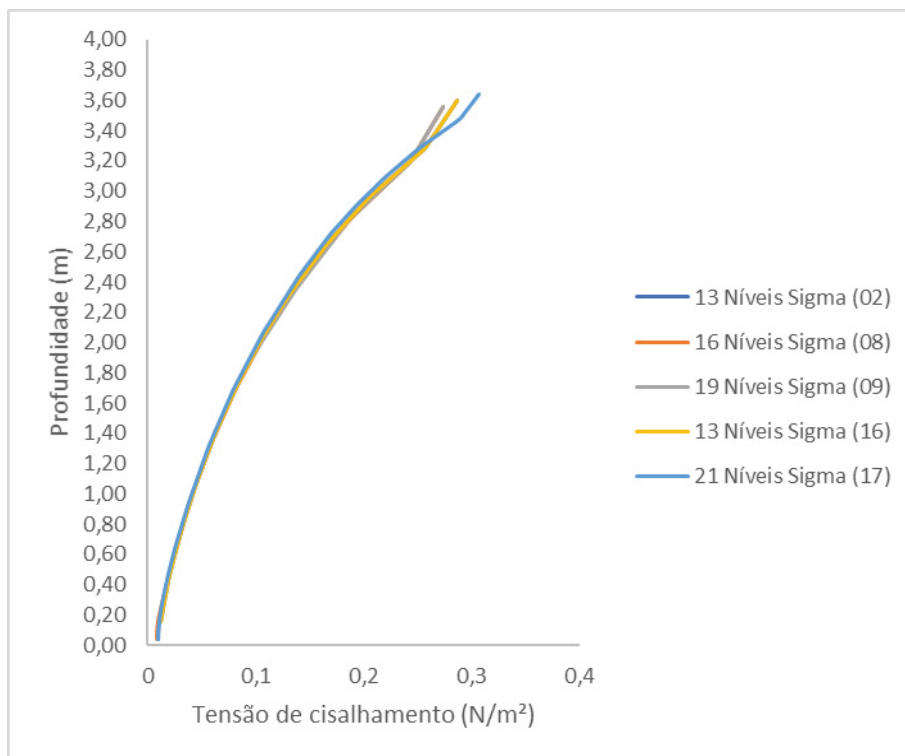


FIGURA 20 - PERFIS VERTICAIS DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA ESTAÇÃO E03

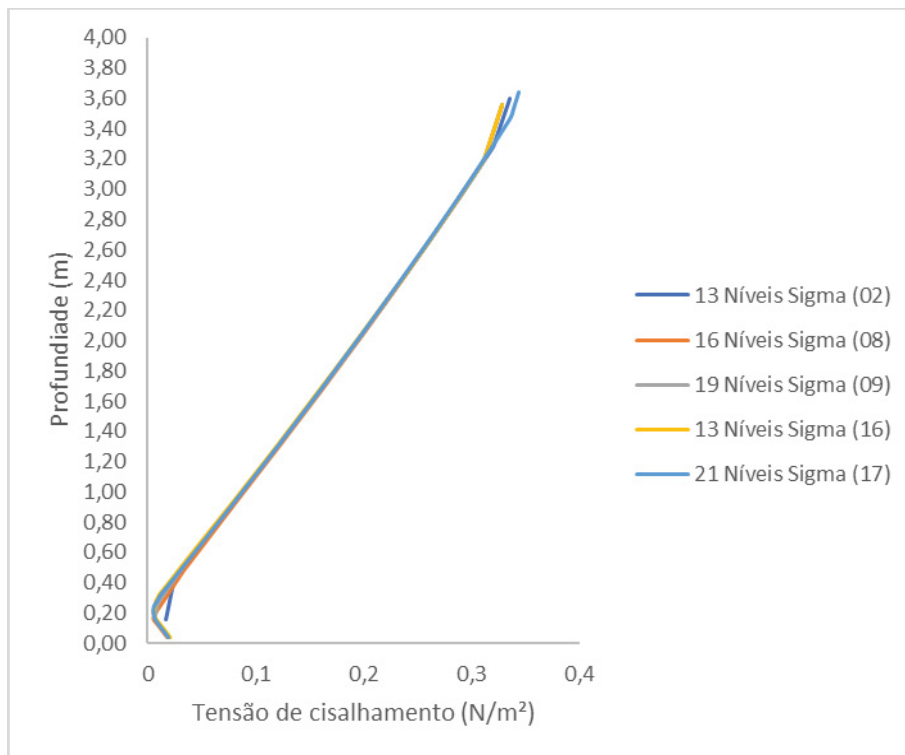


FIGURA 21 – PERFIS VERTICAIS DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA ESTAÇÃO E01

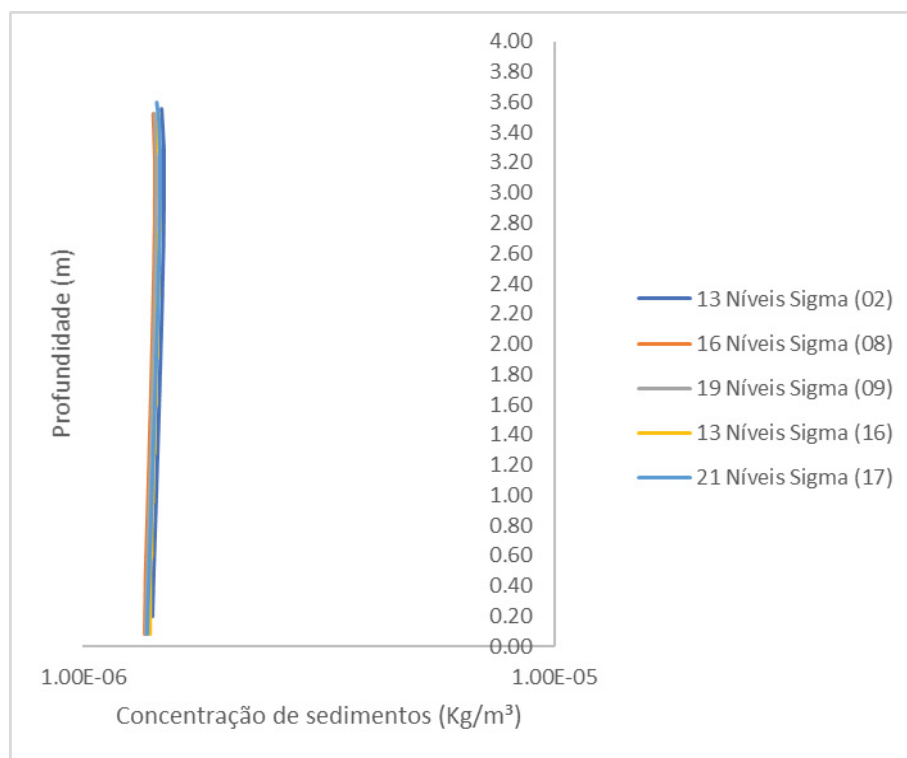


FIGURA 22 - PERFIS VERTICAIS DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA ESTAÇÃO E02

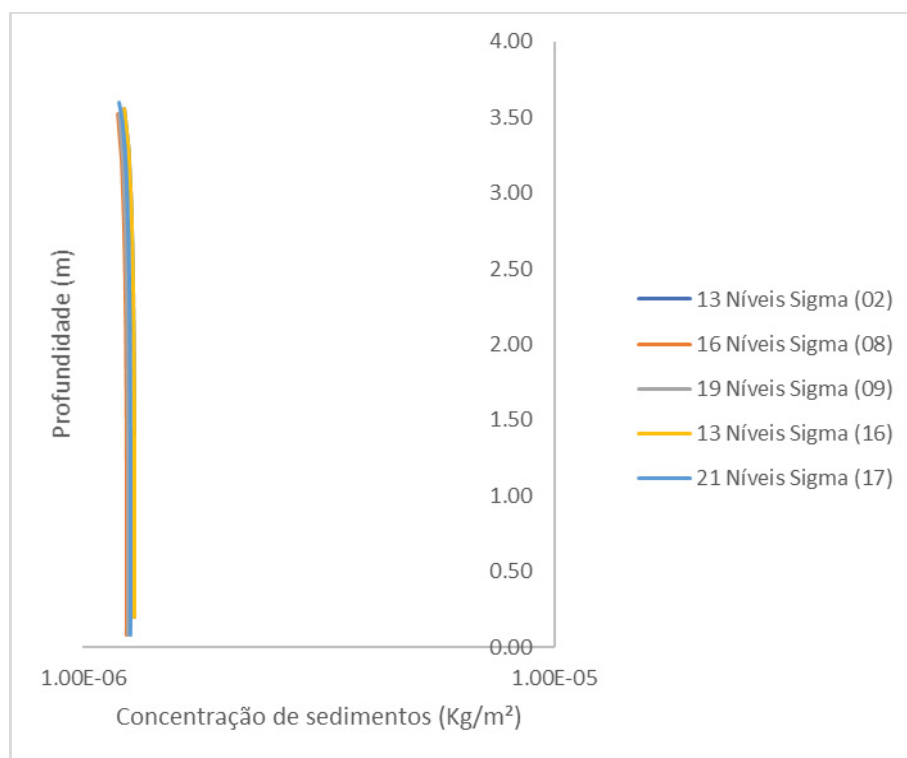


FIGURA 23 – PERFIS VERTICAIS DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS SUSPENSOS NA ESTAÇÃO E03

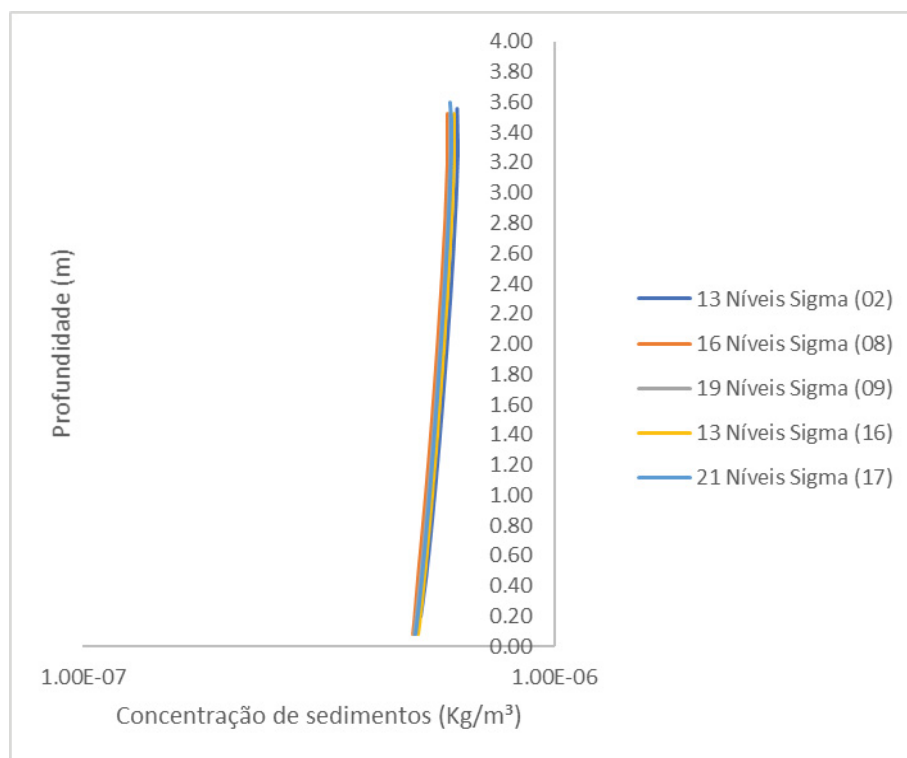


FIGURA 24 – DESVIOS RELATIVOS REFERENTES A TAU E CSS NA ESTAÇÃO E01

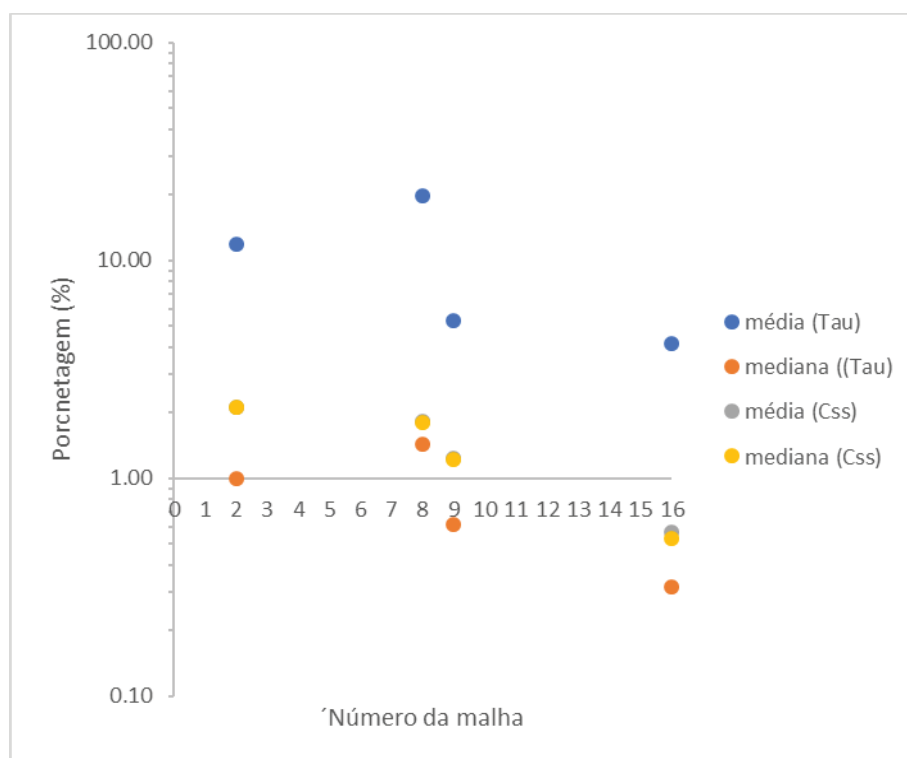




FIGURA 25 – DESVIOS RELATIVOS REFERENTES A TAU E CSS NA ESTAÇÃO E02

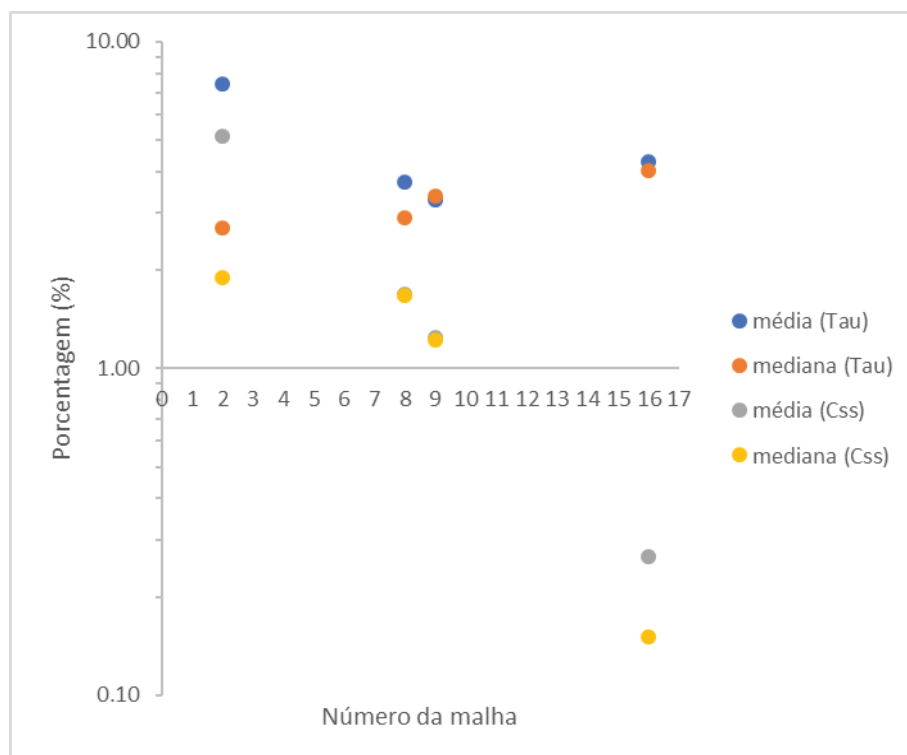


FIGURA 26 – DESVIOS RELATIVOS REFERENTES A TAU E CSS NA ESTAÇÃO E03

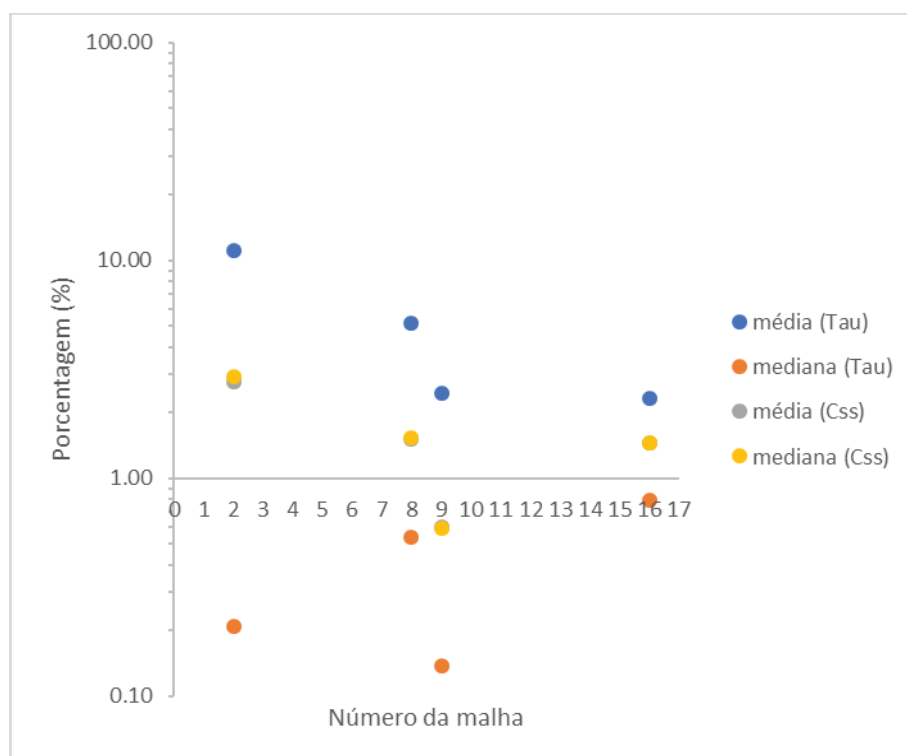


TABELA 17 – VALORES MÉDIOS E MEDIANOS DOS DESVIOS NOS PERFIS DE TAU, CSS E VALORES DE ERS

Estação	Simulação		2	8	9	16	17
	Níveis Sigma		13	16	19	13	21
E01	Tau <sub>cr</sub>	média (%)	11.85	19.82	5.29	4.17	-
		mediana (%)	1.00	1.43	0.61	0.32	-
	C <sub>ss</sub>	média (%)	2.12	1.83	1.24	0.57	-
		mediana (%)	2.13	1.81	1.22	0.53	-
E02	Tau <sub>cr</sub>	média (%)	7.44	3.72	3.29	4.31	-
		mediana (%)	2.69	2.90	3.38	4.02	-
	C <sub>ss</sub>	média (%)	5.15	1.70	1.25	0.27	-
		mediana (%)	1.90	1.68	1.23	0.15	-
E03	Tau <sub>cr</sub>	média (%)	11.19	5.17	2.47	2.33	-
		mediana (%)	0.21	0.54	0.14	0.79	-
	C <sub>ss</sub>	média (%)	2.79	1.52	0.60	1.45	-
		mediana (%)	2.92	1.53	0.59	1.46	-
E01	ERS (%)		83.4	83.7	83.6	83.4	83.4

TABELA 18 – SIMULAÇÕES COM A MALHA HORIZONTAL DE 5X5m

Simulação	Cenário	Q (m³/s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)	ERS (%)
69	G2	3	5	O-L	00-10	10 <sup>-5</sup>	84,0
70	G2	3	5	O-L	10-50	10 <sup>-5</sup>	83,8
71	G2	3	5	O-L	00-10	10 <sup>-6</sup>	21,2

Ao comparar as simulações da malha de 5x5m com as correspondentes realizadas com a malha de 10x10m, notou-se discrepâncias relativamente baixas nos valores de ERS, de 0,6%, 0,5% e 0,3%, para as simulações 01-69, 42-70 e 25-71, respectivamente. Devido à pequena diferença entre os resultados obtidos com essas duas malhas, concluiu-se que a malha de 10x10m conferia resolução horizontal suficiente e poderia ser usada nas demais simulações deste estudo.

#### 4.2.5 Análises de Sensibilidade, Conservação de Massa no Escoamento e Alcance de Regime Permanente

A velocidade de queda de sedimentos ( $W_s$ ) em conjunto com a concentração de sedimentos suspensos ( $C_{ss}$ ) são os parâmetros requeridos no cálculo do fluxo de deposição de sedimentos coesivos (eq. 13). Com isso, para análise do efeito desses

parâmetros na ERS, foram simulados cenários com mesma geometria, condição de vento e vazão para diferentes valores de concentração de sedimentos dentro do reservatório ( $C_{SI}$ ) e concentração da pluma de sedimentos que incide constantemente no reservatório ( $C_{IN}$ ) (TABELA 19).

TABELA 19 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA CONCENTRAÇÕES SUSPENSAS COM  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s

Simulação	Cenário	Q (m³/s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)	ERS (%)
01	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6 $\times 10^{-5}$	83,5
50	G.02	3,0	5,0	O-L	00-500	6,6 $\times 10^{-5}$	83,5
46	G.02	3,0	5,0	O-L	00-1000	6,6 $\times 10^{-5}$	83,5
40	G.02	3,0	5,0	O-L	00-50	6,6 $\times 10^{-5}$	83,5
41	G.02	3,0	5,0	O-L	10-10	6,6 $\times 10^{-5}$	82,5
42	G.02	3,0	5,0	O-L	10-50	6,6 $\times 10^{-5}$	83,3
43	G.02	3,0	5,0	O-L	50-50	6,6 $\times 10^{-5}$	82,5

Para os casos em que a  $C_{SI}$  era de 0 mg/L, simulações 01, 40, 46 e 50, a ERS foi de 83,5% independentemente do valor de  $C_{IN}$ . Já para os casos em que a  $C_{SI}$  era igual  $C_{IN}$ , a ERS foi de 82,5%, variando apenas 1% em relação à condição de referência. Esses resultados mostraram que a variação dos valores de  $C_{SI}$  (0 a 50 mg/L) e  $C_{IN}$  (10 a 1000 mg/L) não exerceu efeito expressivo sobre a ERS.

Analisando as mesmas condições de concentração de sedimentos para a velocidade de queda  $W_s = 6,6 \times 10^{-6}$  m/s, observa-se que o efeito da variação de  $C_{SI}-C_{IN}$  também foi desprezível (TABELA 20).

TABELA 20 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA CONCENTRAÇÕES SUSPENSAS COM  $W_s = 6,6 \times 10^{-6}$  m/s

Simulação	Cenário	Q (m³/s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)	ERS (%)
25	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6 $\times 10^{-6}$	21,5
44	G.02	3,0	5,0	O-L	00-50	6,6 $\times 10^{-6}$	21,5
45	G.02	3,0	5,0	O-L	10-50	6,6 $\times 10^{-6}$	21,3
48	G.02	3,0	5,0	O-L	00-1000	6,6 $\times 10^{-6}$	20,9

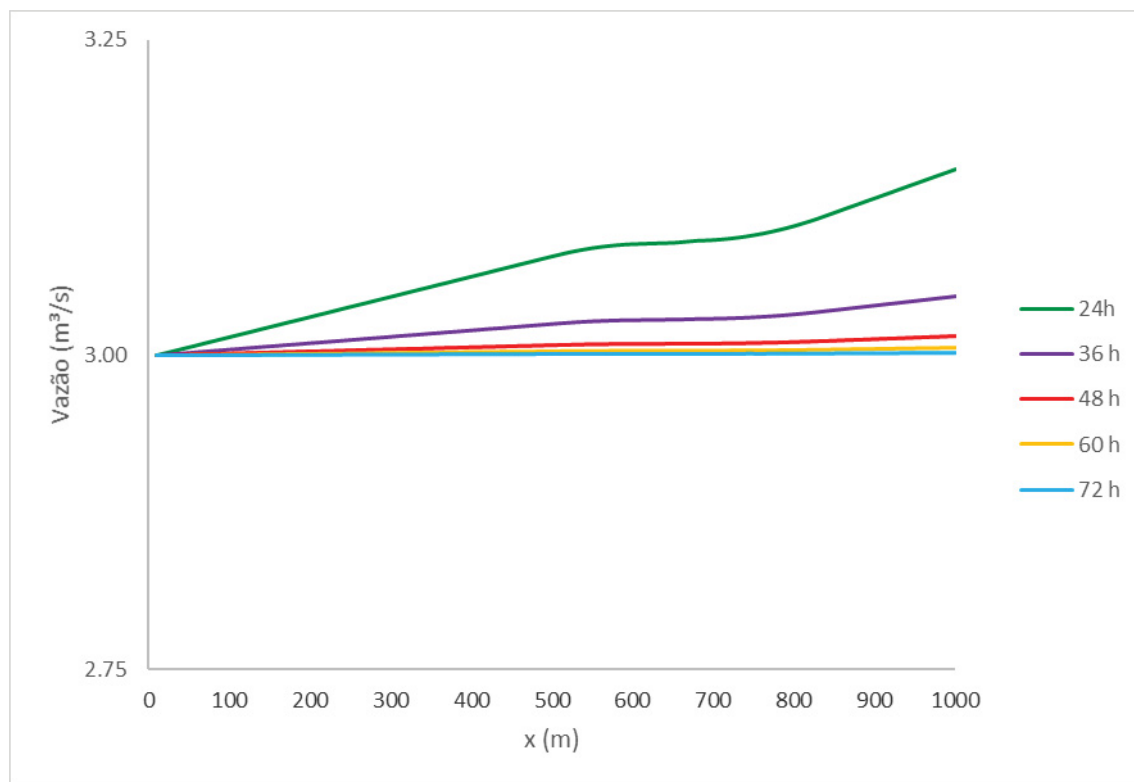
Porém, ao comparar o efeito de  $W_s$  para as mesmas condições de  $C_{ss}$ , simulações 01-25, 40-44, 42-45 e 46-50, observa-se que os valores de ERS obtidos

com  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s foram consideravelmente maiores do que os valores de ERS correspondentes obtidos com  $W_s = 6,6 \times 10^{-6}$  m/s. Isso se explica pela relação diretamente proporcional entre  $W_s$ , a taxa de deposição e a ERS, ou seja, quanto menor a  $W_s$ , menor será a taxa de deposição e conseqüentemente menor será a ERS na região de estudo.

Essas análises apontam que as alterações nos parâmetros CSI- $C_{IN}$  não causaram variações significativas no resultado de ERS, dessa forma não havendo importância a variação entre os valores de CSI e  $C_{IN}$ , nas faixas consideradas. Ao variar a velocidade de queda do sedimento em uma ordem de grandeza (com valores condizentes aos considerados na literatura, vide TABELA 05 de estudos semelhantes), foram notadas diferenças expressivas nos valores de ERS, variáveis em relação ao cenário simulado, e superiores a 60% em alguns casos. Com isso, observou-se que  $W_s$  é um parâmetro sensível das simulações e sua influência sobre a ERS deve ser considerada caso a caso, em relação às demais condições hidrossedimentológicas de uma simulação.

Conforme informado na seção 4.2.2, o enfoque analítico do presente estudo está em condições hidrossedimentológicas de regime permanente, obtidas em simulações computacionais realizadas com partida a frio. O alcance do regime permanente hidrodinâmico foi avaliado com base nos valores da vazão volumétrica calculada ao longo do domínio fluido, considerando a vazão dada como condição de contorno a cada simulação. Para cada intervalo de passos de tempo definido para a gravação de resultados do modelo, foi extraída a vazão em cada seção transversal ao longo do eixo longitudinal do reservatório, conforme exemplificado na FIGURA 27 para a vazão de  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Notou-se que, com o aumento do tempo de simulação, ocorreu a convergência dos valores de vazão ao longo do domínio fluido até a vazão nominal, com desvio máximo de 4,9 % em  $t = 24 \text{ h}$ , 0,5% em  $t = 48 \text{ h}$  e 0,04% em  $t = 72 \text{ h}$ . Isso confirmou a ocorrência de conservação de massa no escoamento, com base na equação da continuidade (Eq. 02) e alcance do regime permanente hidrodinâmico em tempo computacional inferior a três dias.

FIGURA 27– VARIAÇÃO TEMPORAL DO PERFIL LONGITUDINAL DA VAZÃO VOLUMÉTRICA, INDICANDO CONSERVAÇÃO DE MASSA E CONVERGÊNCIA PARA REGIME PERMANENTE HIDRODINÂMICO A PARTIR DE  $T = 24\text{h}$  NAS SIMULAÇÕES COM VAZÃO NOMINAL DE  $3\text{ m}^3/\text{s}$



O módulo de transporte de sedimentos do modelo computacional foi ativado no início do segundo dia de uma simulação, de modo a promover sua convergência concomitantemente à convergência hidrodinâmica nos dias dois e três do tempo computacional. Para cada simulação, foram especificadas a concentração inicial de sedimentos suspensos coesivos (CSI) no interior do domínio fluido, a concentração de sedimentos suspensos coesivos na seção de entrada (mantida constante em cada simulação) e concentração nula de sedimentos suspensos coesivos na seção de saída. Então, foi analisado o padrão de variação temporal dos valores da descarga sólida ( $Q_s$ ) ao longo do domínio fluido, conforme exemplificado na FIGURA 28. Isso foi feito para as velocidades de queda do sedimento de  $6,6 \times 10^{-5}\text{ m/s}$  e  $6,6 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ . Nota-se, na FIGURA 28, que houve tendência à convergência do perfil de  $Q_s$  ao longo do eixo de escoamento. O padrão de redução da descarga sólida ao longo do domínio fluido indicou a esperada ocorrência de deposição dos sedimentos ao longo do eixo do domínio fluido. A concentração de sedimentos na saída do domínio fluido ( $C_{OUT}$ ), em  $x$  igual a 1000 metros, foi adotada como  $0\text{ mg/L}$ . Essa condição de contorno de jusante proporcionou o aporte de sedimentos no corpo

hídrico apenas pela seção de montante. Essa condição de saída, influenciou o perfil longitudinal de  $Q_s$  próximo à saída do domínio fluido, ocasionando uma queda brusca após a seção  $x$  igual a 980 metros, tendendo a zero.

Na análise de convergência para regime permanente do transporte de sedimentos, foi realizado o desvio ( $\sigma$ ) por meio da somatória do quadrado das diferenças entre valores de  $Q_s$  (eq. 42) para a mesma seção transversal ( $x$ ) em cada passo de tempo ( $t$ ), conforme a equação:

$$\sigma = \sum (q_{s_{t+1}} - q_{s_t})^2 \quad (42)$$

Foi realizada a plotagem dos resultados desse parâmetro de desvio, conforme mostrado na FIGURA 29. Observou-se um padrão de assíntota, indicando convergência do padrão de transporte de sedimentos ao longo do domínio fluido em função do tempo (FIGURA 29).

FIGURA 28 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO PERFIL LONGITUDINAL DA DESCARGA SÓLIDA PARA  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s,  $CSI=0$  mg/l,  $C_{IN}= 10$  mg/l, INDICANDO CONVERGÊNCIA PARA REGIME PERMANENTE HIDROSEDIMENTOLÓGICO A PARTIR DE  $t = 24$  h NAS SIMULAÇÕES COM VAZÃO NOMINAL DE  $3 \text{ m}^3/\text{s}$

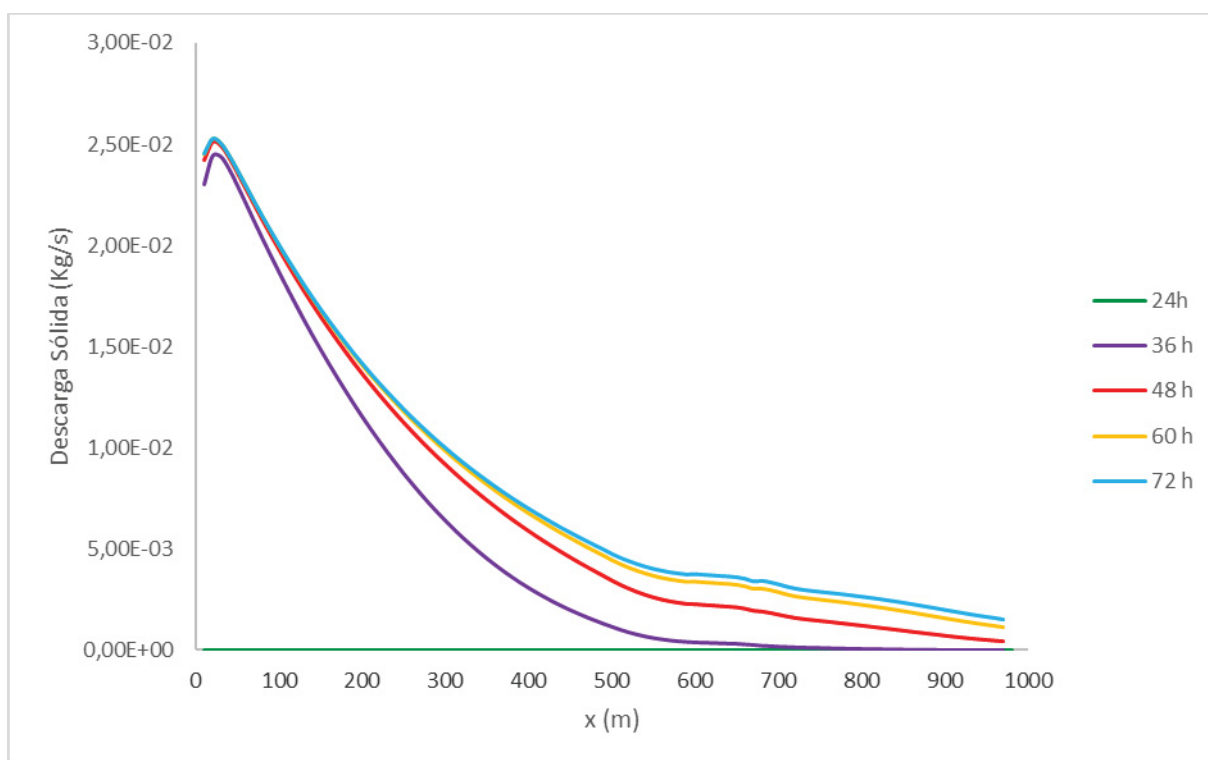
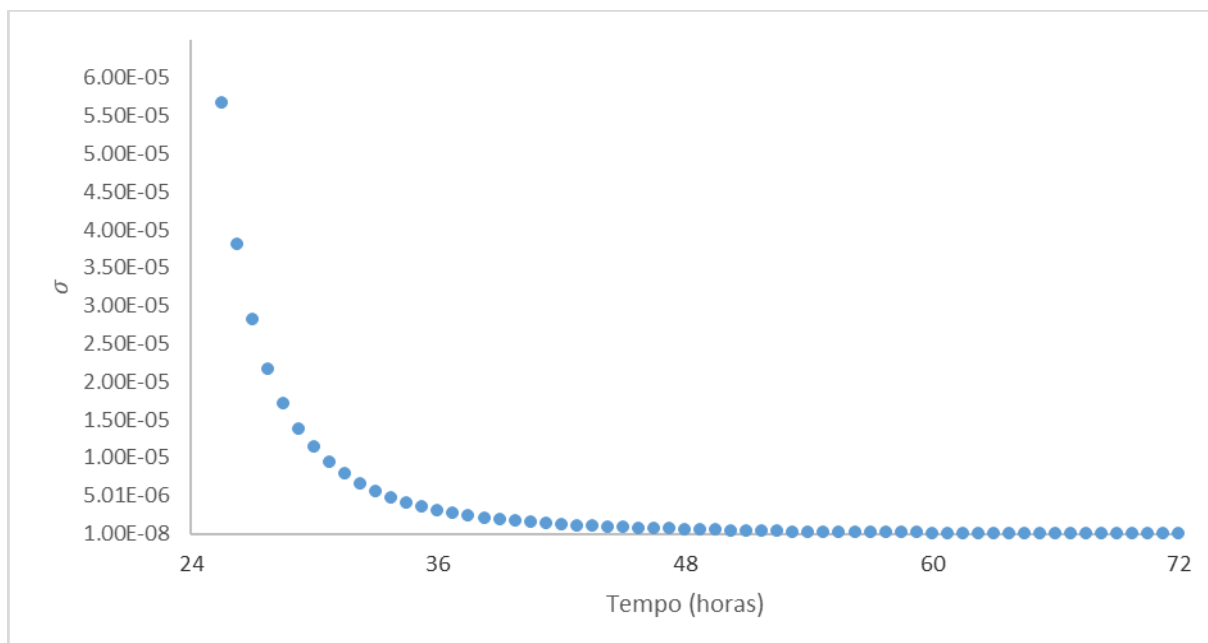


FIGURA 29 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO PARÂMETRO DE DESVIO ENTRE PERFIS LONGITUDINAIS CONSECUTIVOS DE DESCARGA SÓLIDA, INDICANDO CONVERGÊNCIA NO PADRÃO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, CONFORME OBTIDO PARA  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s



Com isso, para  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s e  $W_s = 6,6 \times 10^{-6}$  m/s, a convergência para regime permanente hidrossedimentológico foi verificado ao final do terceiro dia e sexto dia de simulação, respectivamente.

Por se tratar de um corpo de água idealizado, para qual não há dados medidos, não foi realizada a validação dos resultados da modelagem. Contudo, os testes de estabilidade, testes de malha no plano horizontal e na direção vertical e análises de sensibilidade conferem significado prático aos resultados da modelagem. A FIGURA 30 apresenta o percentual de deposição de sedimentos por trecho, ou seja, o percentual que foi depositado a cada 100 metros. Observa-se que o percentual em cada trecho foi: de 0 m a 100 m (22,09%), de 100 m a 200 m (20,51%), de 200 m a 300 m (16,86%), de 300 m a 400 m (12,04%), e de 400 m a 500 m (8,73%). A deposição acumulada (FIGURA 31) até a seção x igual a 500 metros foi de 80,23%.

FIGURA 30 – PERCENTUAL DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS POR TRECHO AO LONGO DO CORPO HÍDRICO, CORRESPONDENTE A 3 DIAS DE SIMULAÇÃO, PARA  $CSI = 0$  mg/L,  $C_{IN} = 10$  mg/L E  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s .

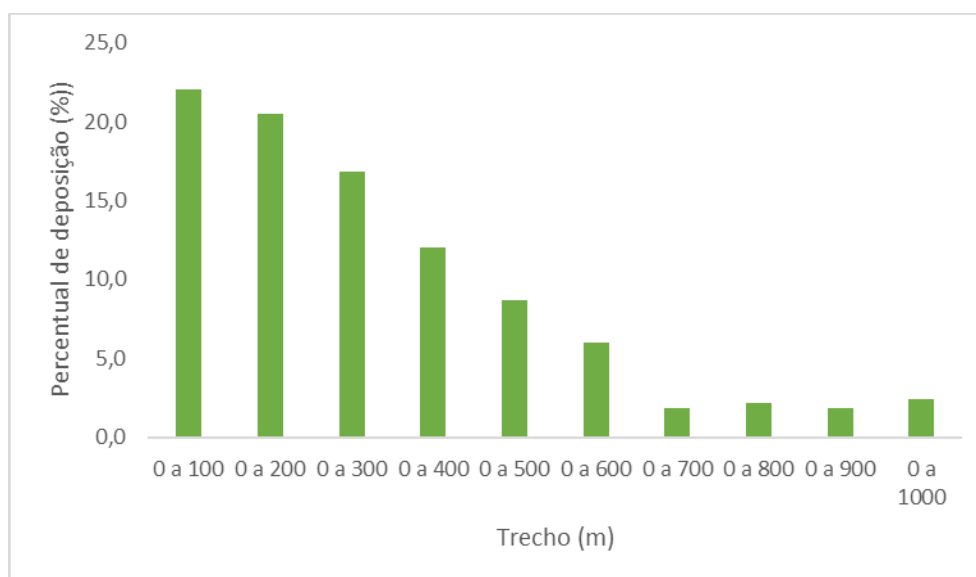
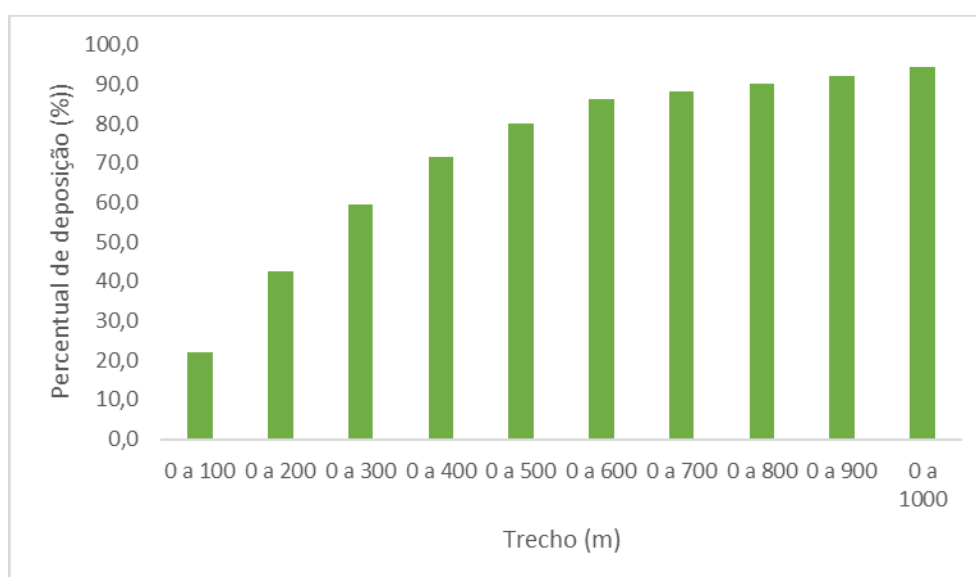


FIGURA 31 – PERCENTUAL DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS ACUMULADA POR TRECHO AO LONGO DO CORPO HÍDRICO, CORRESPONDENTE A 3 DIAS DE SIMULAÇÃO, PARA  $CSI = 0$  mg/L,  $C_{IN} = 10$  MG/L E  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s .



#### 4.2.6 Execução das Simulações Principais

Conforme indicado no QUADRO 2 (passos metodológicos), este passo envolveu, primeiramente, a edição dos arquivos de entrada do modelo computacional de modo a refletir os cenários elaborados no passo 2. Todas as simulações foram executadas em micro-computadores *desktop* com a configuração



de referência: chipset Intel Duo Core 2,93 GHz com 2GB de memória RAM, e tiveram duração típica de 20h de tempo real para três dias de tempo computacional, com cálculos do módulo hidrodinâmico nos três dias e do módulo de transporte de sedimentos suspensos coesivos nos dias dois e três.

A conferência dos arquivos de saída foi feita quanto aos critérios definidos no passo 4. Conforme necessário, os passos 5.1 a 5.3 foram repetidos até a consecução de resultados válidos para cada condição simulada.

#### 4.2.7 Processamento e Análise de Resultados

Este passo envolveu, primeiramente, a tabulação dos resultados das simulações em planilhas eletrônicas, utilizando o *software* Microsoft Excel, por meio do qual também foi feita a plotagem de gráficos.

O cálculo da ERS de cada condição simulada foi realizado por dois métodos, para comparação: cálculo em função do balanço de massa de sedimentos; e cálculo a partir do método de Churchill. Para o cálculo da ERS em função do balanço de massa, sabe-se que o fluxo de massa retido ( $\dot{M}_r$ ) é a diferença entre o fluxo de massa de sedimentos que entra ( $\dot{M}_{IN}$ ) e que sai do corpo hídrico ( $\dot{M}_{ss}$ ). ERS é definida (seção 3.3.1) como a razão entre o fluxo de massa de sedimentos retida ( $\dot{M}_r$ ) e o fluxo de massa de sedimentos afluente ( $\dot{M}_{IN}$ ). Para transporte de sedimentos, a descarga sólida ( $Q_s$ ) é utilizada no balanço de massa. Sendo os valores de vazões líquidas de entrada e saída iguais durante as simulações ( $Q_{IN} = Q_{ss} = Q$ ), obteve-se a ERS em função da concentração de sedimentos suspensos. Com isso, foi obtida a relação (Eq. 43) envolvendo a concentração de sedimentos na entrada ( $C_{IN}$ ) e na seção x igual a 500 m ( $C_{ss}$ ).

$$\dot{M}_r = \dot{M}_{IN} - \dot{M}_{ss}$$

Sendo:

$$ERS = \frac{\dot{M}_r}{\dot{M}_{IN}}$$

Tem-se:

$$ERS = \frac{\dot{M}_{IN} - \dot{M}_{ss}}{\dot{M}_{IN}} = \frac{Q_{s,IN} - Q_{s,ss}}{Q_{s,IN}}$$

Portanto:

$$ERS = \frac{Q \cdot C_{IN} - Q \cdot C_{SS}}{Q \cdot C_{IN}} = \frac{C_{IN} - C_{SS}}{C_{IN}}$$

$$ERS (\%) = \frac{C_{IN} - C_{SS}}{C_{IN}} \cdot 100$$

(43)

Para o cálculo da ERS com base no método de Churchill foi utilizado o procedimento explicado na seção 2.3.1, de modo automatizado no *software* SEDIMENT (MENDES, 2005). Os dados de entrada para tais cálculos foram as características da região confinada até o início do estreitamento de seção (estação E01), sendo elas: comprimento de 500 m, volume de 0,46 hm<sup>3</sup>, descarga sólida afluyente de 946,08 ton/ano (sendo composta por 87% de silte 6,5% de argila e 6,5% de areia), tipo de operação associado ao leito sempre submerso para as descargas líquidas de 3,0 m<sup>3</sup>/s, 1,0 m<sup>3</sup>/s e 0,1 m<sup>3</sup>/s. Com essas condições e dados de entrada foi obtida a ERS de 83,15%, 94,86% e 99,00%, respectivamente para cada descarga líquida, e densidade aparente do leito de 1,1 g/cm<sup>3</sup>.

A plotagem de campos de velocidade, linhas de corrente e grandezas escalares foi realizada no *software* gráfico Paraview versão 5.6 (KITWARE, 2019).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na seção 4.1 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para a geometria G.02 sob diferentes condições de vazão, vento e velocidade de queda dos sedimentos em suspensão. Na seção 4.2, os resultados correspondentes obtidos para as três configurações geométricas estudadas (G.01, G.02 e G.03) são contrastados para avaliação do efeito da geometria na ERS, com o intuito de verificar a hipótese de pesquisa associada aos efeitos do confinamento parcial sobre a hidrodinâmica e a retenção de sedimentos na região a montante do estreitamento de seção no corpo de água.

Para análise hidrodinâmica, os campos de velocidade foram divididos em três camadas do escoamento, variando de acordo com a profundidade: uma camada superior (próxima à superfície livre), situada em  $z$  igual a 380 cm; uma camada central (à meia profundidade), situada em  $z$  igual a 200 cm; e uma camada próxima ao leito, situada em  $z$  igual a 12 cm.

### 5.1. IMPORTÂNCIA RELATIVA DA VAZÃO, DO VENTO E DA VELOCIDADE DE QUEDA DOS SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NA ERS

#### Influência da variação de vazão

A fim de avaliar a resposta da ERS às variações de vazão, foram simulados cenários com as mesmas condições de vento e geometria, para os dois valores de  $W_s$  aqui considerados. Conforme mostrado na TABELA 21, nota-se que a ERS apresentou tendência de aumento concomitantemente à redução do valor de vazão, nas simulações com  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s.

O padrão de escoamento obtido para as diferentes vazões é similar, conforme mostrado nas FIGURAS 30 e 31. Notou-se, por exemplo, que a camada superior ( $z$  igual a 3,80 m) apresentou perfil de velocidade isento de recirculação horizontal (FIGURA 32 A e 33 A). Porém nas camadas central e próximo ao leito ( $z$  igual a 2,00 m e 0,12 m, respectivamente), na região a jusante do canal de ligação, foram observadas recirculações no plano horizontal correspondente, as quais se conectavam com recirculações verticais na região situada a jusante do canal de ligação (FIGURA 32 B e C e 33 B e C). Tal padrão de escoamento foi similar entre

as diferentes condições de vazão simuladas.

TABELA 21 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE VAZÃO

Simulação	Geometria	Q (m³/s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)	ERS (%)
01	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	83,50
58	G.02	1,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	94,24
64	G.02	0,1	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	97,44
25	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	21,50
07	G.02	3,0	0,0	-	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	96,17
51	G.02	1,0	0,0	-	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	99,92

Devido a essa similaridade no padrão de escoamento obtido sob os três valores de vazão, concluiu-se que o fator dominante no aumento da ERS com a redução da vazão foi o aumento do tempo médio de residência associado à redução da velocidade média do escoamento. Isso resultou em um aumento da ERS em aproximadamente 11% quando a vazão foi reduzida de 3,0 m³/s para 1,0 m³/s. Já a diminuição da vazão de 1,0 m³/s para 0,1 m³/s resultou e em um aumento adicional de 3% na ERS.

Os resultados de ERS obtidos pelo método de Churchill para as condições de vazão de 3,0 m³/s, 1,0 m³/s e 0,1 m³/s foram 83,15%, 94,86% e 99,00%, respectivamente. Ao comparar esses resultados com a ERS da condição de vazão correspondente obtida com o ECOMSED para a geometria G.02, com vento 5OL e  $W_s = 6,6 \times 10^{-5}$  m/s (TABELA 21), simulações 01, 58 e 64, observou-se certa proximidade – discrepâncias de 0,4%, 0,6% e 1,6%, respectivamente. Para outros cenários quanto à condição de vento e ao valor de  $W_s$  – também realistas para o problema estudado, as estimativas de ERS obtidas com o método de Churchill foram expressivamente diferentes daquelas obtidas com o ECOMSED (como mostrado na sequência deste texto). Justifica-se essa variação de resultados pela simplicidade e dimensionalidade reduzida do método de Churchill.

Observa-se que a vazão e ERS são parâmetros inversamente proporcionais. De acordo com a equação da continuidade (01), para uma mesma seção transversal, a velocidade média do escoamento diminui proporcionalmente a uma diminuição de vazão.

Zheng et al. (2014) e Kocigit e Falconer (2004) indicaram em seus estudos

que a vazão e intensidade do vento são parâmetros que influenciam o transporte de sedimentos. A velocidade de escoamento no meio pode prorrogar a deposição (OMER et al., 2015), de modo que as maiores velocidades promovem um grau reduzido de deposição (BOTELHO et al., 2013), e consequentemente uma maior concentração de sedimentos suspensos por maior extensão do corpo de água (CHEN; WANG, 2008; DU et al., 2010; LUO et al., 2013).

FIGURA 32 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m<sup>3</sup>/s, GEOMETRIA G.02 E VENTO V50L (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO)

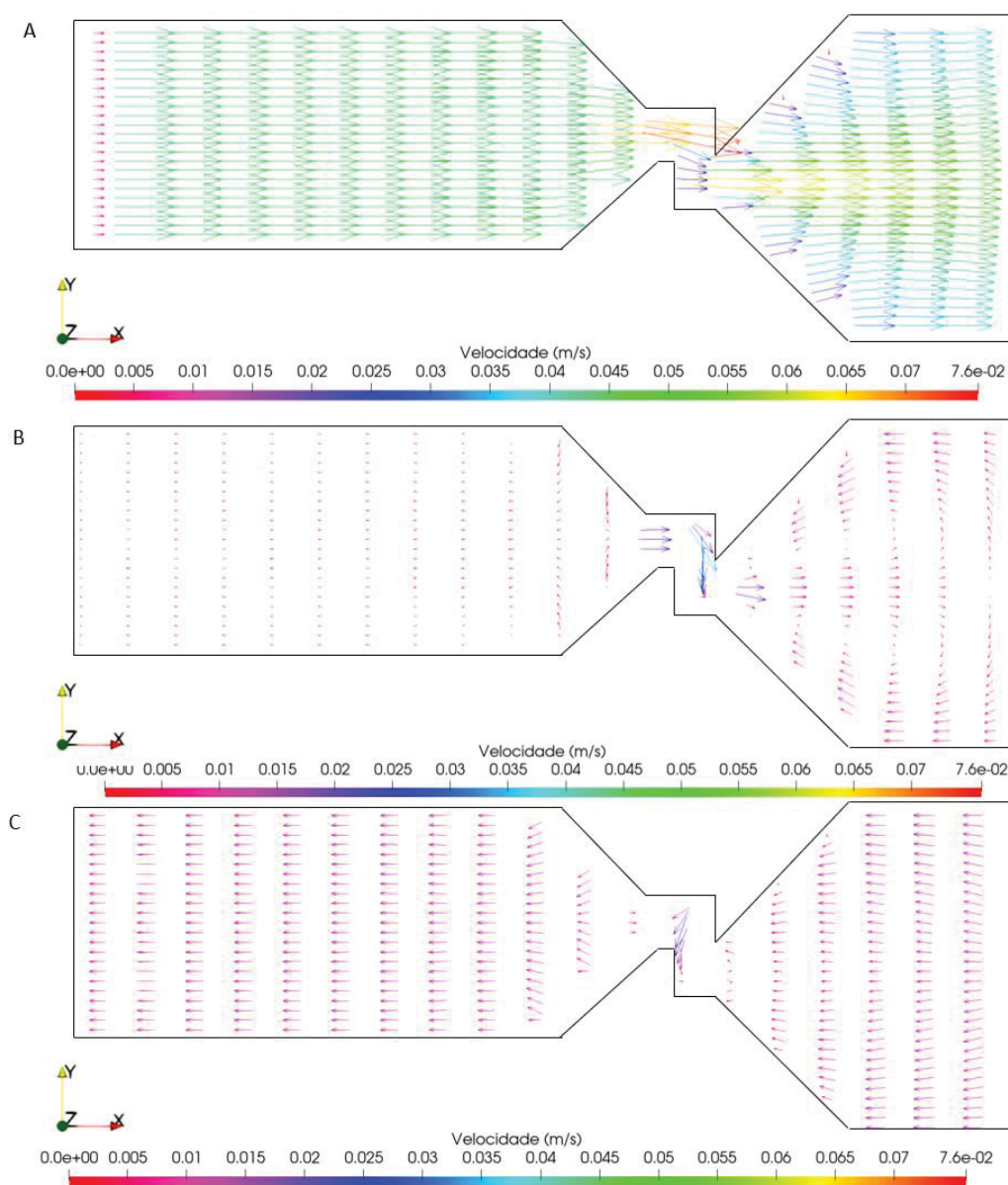
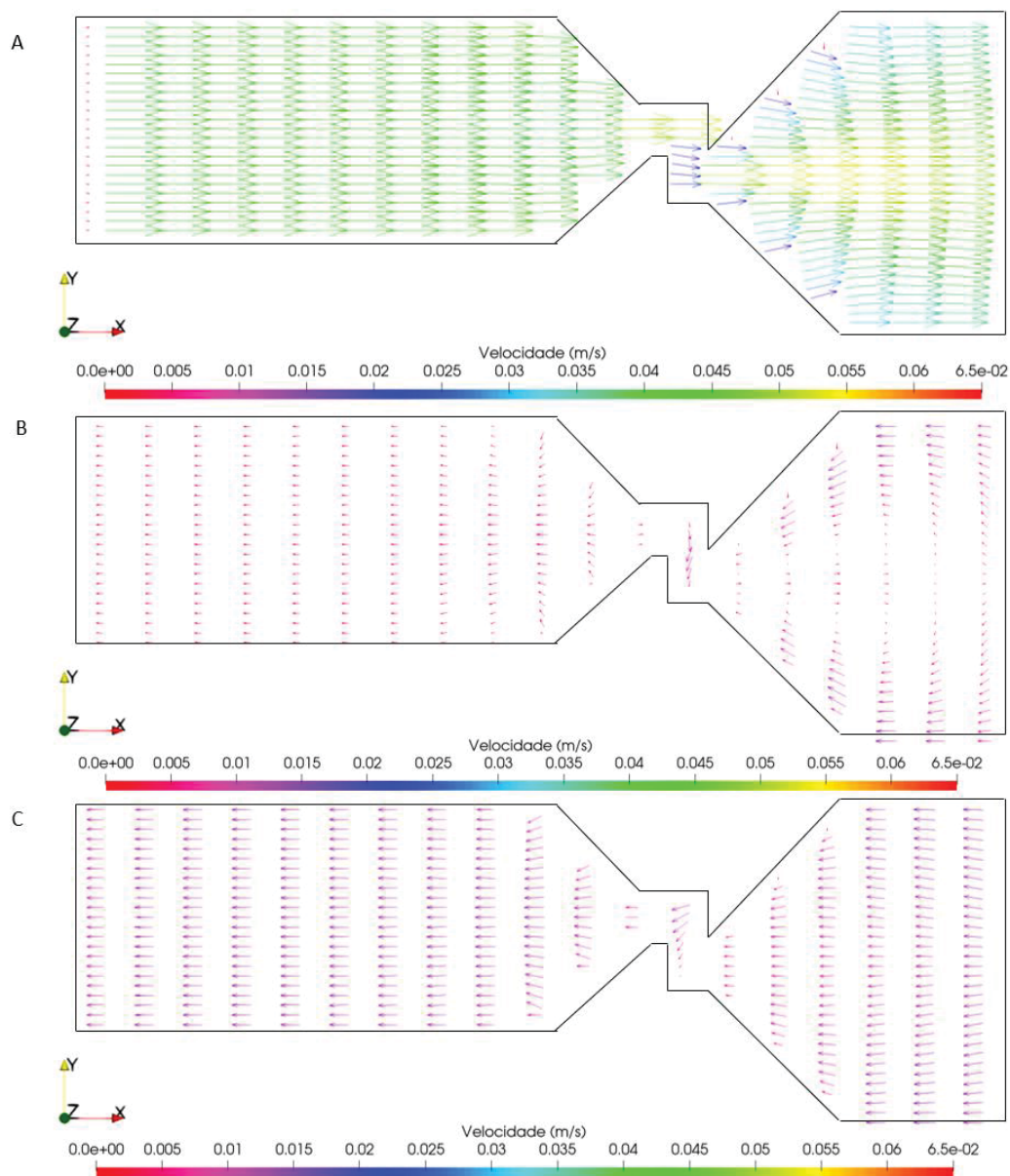


FIGURA 33 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , GEOMETRIA G.02 E VENTO V50L (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO)



Rueda et al. (2006) e Gu et al. (2016) mencionaram que um maior tempo de retenção de sedimentos dentro de um corpo hídrico gera uma maior eficiência de retenção de sedimentos.

Para uma mesma condição de vazão ( $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e vento (V50L), os resultados da TABELA 21 mostram que a diminuição da velocidade de queda do sedimento em uma ordem de grandeza causou uma redução na ERS de 62%.



### Influências do vento

Com o propósito de verificar a influência do vento na ERS, primeiramente foi caracterizado o cenário sem vento (V0), para o qual ocorreu o maior valor de ERS com cada  $W_s$ , conforme mostrado na TABELA 22.

TABELA 22 - CONDIÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS PARA A ERS NA CONDIÇÃO SEM VENTO

Simulação	Geometria	Q (m <sup>3</sup> /s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)	ERS (%)
07	G.02	3,0	0,0	-	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	96,17
31	G.02	3,0	0,0	-	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	24,00

Para essa condição, apenas a vazão de 3,0 m<sup>3</sup>/s no sentido de oeste para leste foi a forçante do escoamento no corpo de água. O escoamento na região a montante e jusante do canal de ligação direciona-se à saída do corpo hídrico, sem apresentar recirculações verticais e horizontais em qualquer das camadas analisadas (FIGURA 34 A, B e C).

A redução de  $W_s$  em uma ordem de grandeza gerou uma redução de 72,17% na ERS, que foi a maior verificada neste estudo para o efeito apenas da variação de  $W_s$ , em qualquer combinação das demais condições de simulação testadas

Para os casos com vento de intensidade 5,0 m/s na direção longitudinal ao escoamento – seja de oeste para leste (sentido O-L) ou de leste para oeste (sentido L-O), foram observados valores de ERS menores do que para a condição sem vento sob mesmos Q e  $W_s$ , conforme mostrado na TABELA 23.

TABELA 23 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS VENTOS LONGITUDINAIS E  $W_s$

Simulação	Geometria	Q (m <sup>3</sup> /s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)	ERS (%)
01	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	83,47
04	G.02	3,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	82,15
25	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	21,48
28	G.02	3,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	21,43

Notou-se que a inversão do sentido do vento longitudinal causou variação de apenas 1,32% na ERS, com valor ligeiramente superior associado ao sentido OL. Isso pode ser explicado pela semelhança nos padrões de escoamento associados

aos ventos V5OL e V5LO, a não ser pela inversão do sentido de recirculação.

Para o vento V5OL, as velocidades do escoamento na camada superior (FIGURA 35 A) apresentaram uma maior intensidade em relação à condição sem vento (FIGURA 32 A). Nessa camada o fluxo de massa ocorre no sentido Oeste-Leste, exceto em pequenas regiões localizadas ao norte e ao sul da região a jusante do canal de ligação, nas quais ocorreram recirculações horizontais (FIGURA 35 A). Nas camadas central e próxima ao leito, o escoamento ocorreu no sentido leste-oeste, contrário ao da superfície, com recirculações no plano horizontal e vertical. Na região a montante do canal de ligação (FIGURA 35 B e C), observa-se que o fluxo de massa é proveniente das camadas superiores na seção de estrangulamento, e dirige-se às camadas superiores na região de entrada, assim fechando uma recirculação vertical no plano longitudinal-vertical (XZ) do escoamento. A recirculação horizontal ocorre nas proximidades da entrada do canal de ligação, devido ao encontro de fluxos em direções diferentes.

Justifica-se uma ERS menor nessas duas condições de vento longitudinal, comparativamente à condição sem vento, com base em um aumento da intensidade de dispersão no escoamento, associado a maiores graus de advecção diferenciada e difusão turbulenta, o que tende a prejudicar a deposição das partículas de sedimento. Tal efeito teria prevalecido sobre os efeitos de recirculação a montante do canal de ligação favorecerem, em geral, a deposição.

Para uma mesma condição hidrodinâmica,  $W_s$  se mostrou novamente um parâmetro de alta sensibilidade para ERS, que diminuiu em aproximadamente 60% com a redução de  $W_s$  em uma ordem de grandeza, para as condições de vento longitudinal simuladas.

As simulações do corpo de água sujeito a ventos oblíquos ao eixo do reservatório apontaram uma tendência à diminuição da ERS comparado aos cenários anteriores (sem vento e com vento longitudinal), conforme mostrado na TABELA 24. Foram simulados os sentidos sudoeste-nordeste (SO-NL) e nordeste-sudoeste (NL-SO), com a mesma intensidade de 5 m/s considerada anteriormente para os ventos longitudinais.

De modo similar ao que foi observado para os ventos longitudinais ao escoamento, os ventos na direção oblíqua apresentam uma similaridade dos seus padrões hidrodinâmicos, praticamente independente do sentido do vento, variando apenas o sentido das recirculações.



O vento V5NLSO gerou maiores velocidades de escoamento nas camadas superior e inferior, comparadas à condição sem vento, além de recirculações em todas as camadas de escoamento. Para a camada superficial ( $z = 3,80$  m) o sentido do vento (NLSO) apresentou dominância em relação ao sentido do escoamento (OL), em todo o plano (FIGURA 36 A). Nas camadas central e próxima ao leito ( $z = 2,0$  m e  $z = 0,12$  m, respectivamente) ocorreram recirculações horizontais pronunciadas (FIGURA 36 B e C), que ocuparam a maior parte do domínio fluido a montante do estreitamento de seção.

FIGURA 34 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , PARA CONDIÇÃO SEM VENTO ( $V_0$ ) E PARA A GEOMETRIA G.02 (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO).

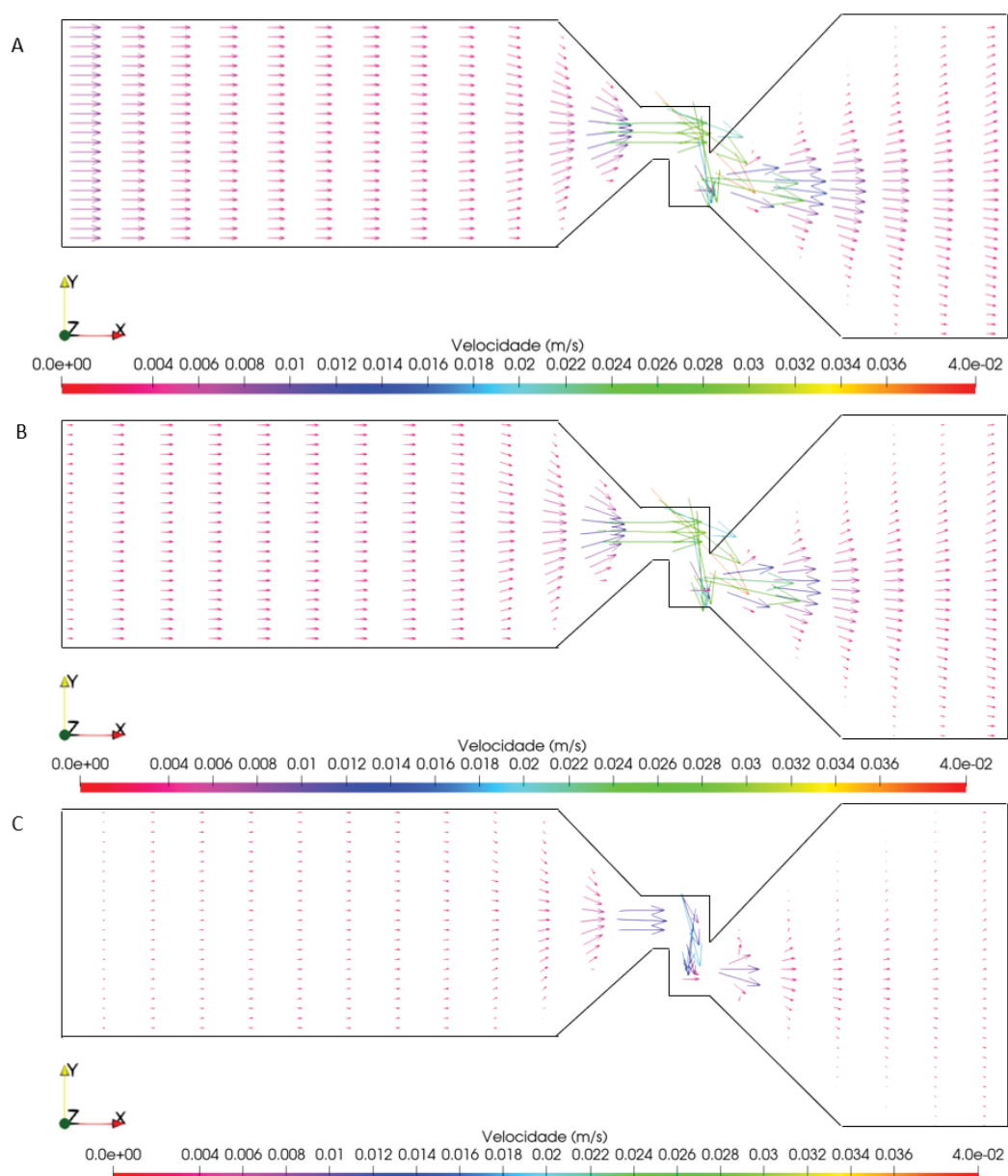


FIGURA 35 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m<sup>3</sup>/s, CONDIÇÃO COM VENTO (V50L) E PARA A GEOMETRIA G.02 (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO)

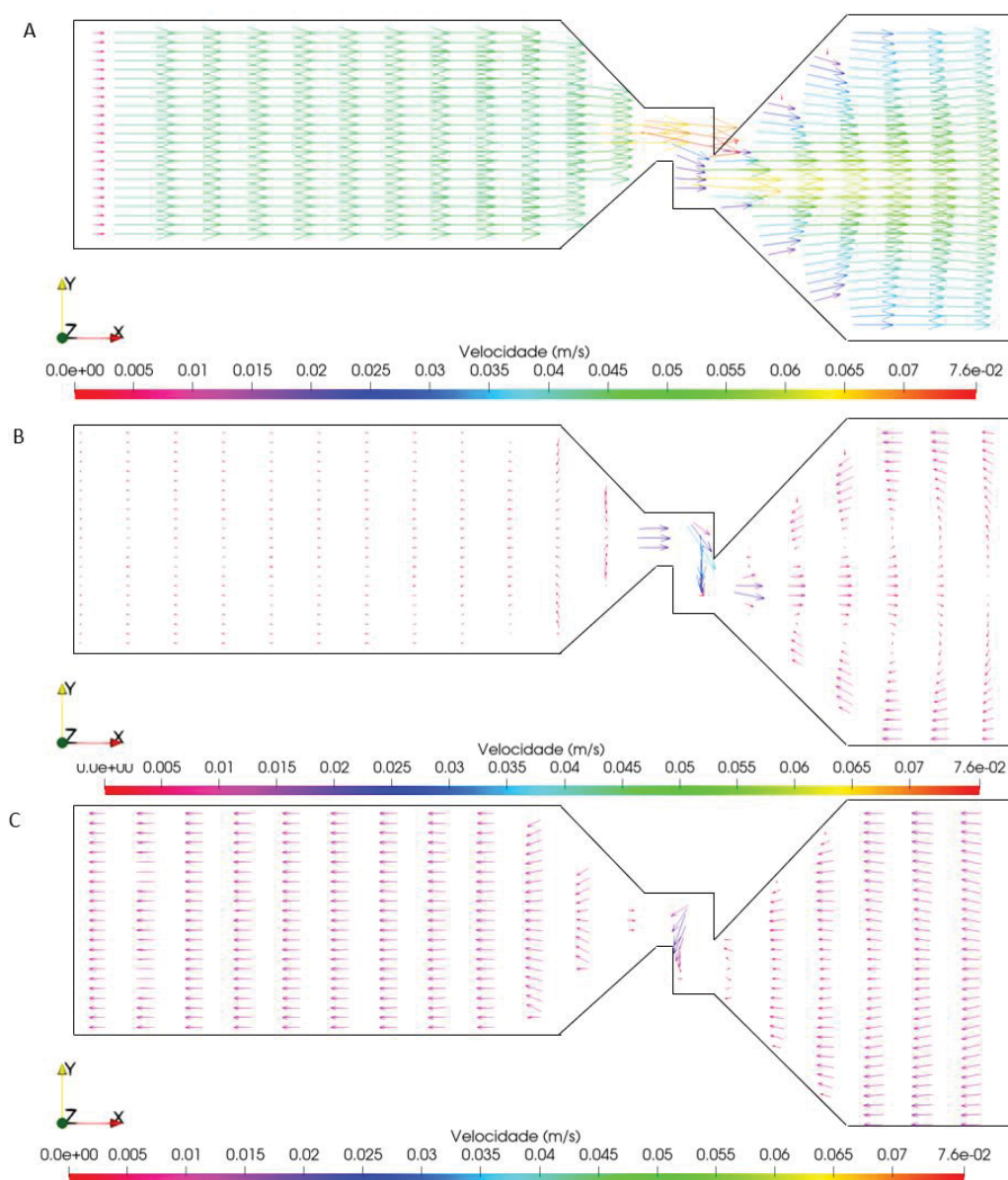


TABELA 24 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS VENTOS OBLÍQUOS E  $W_s$

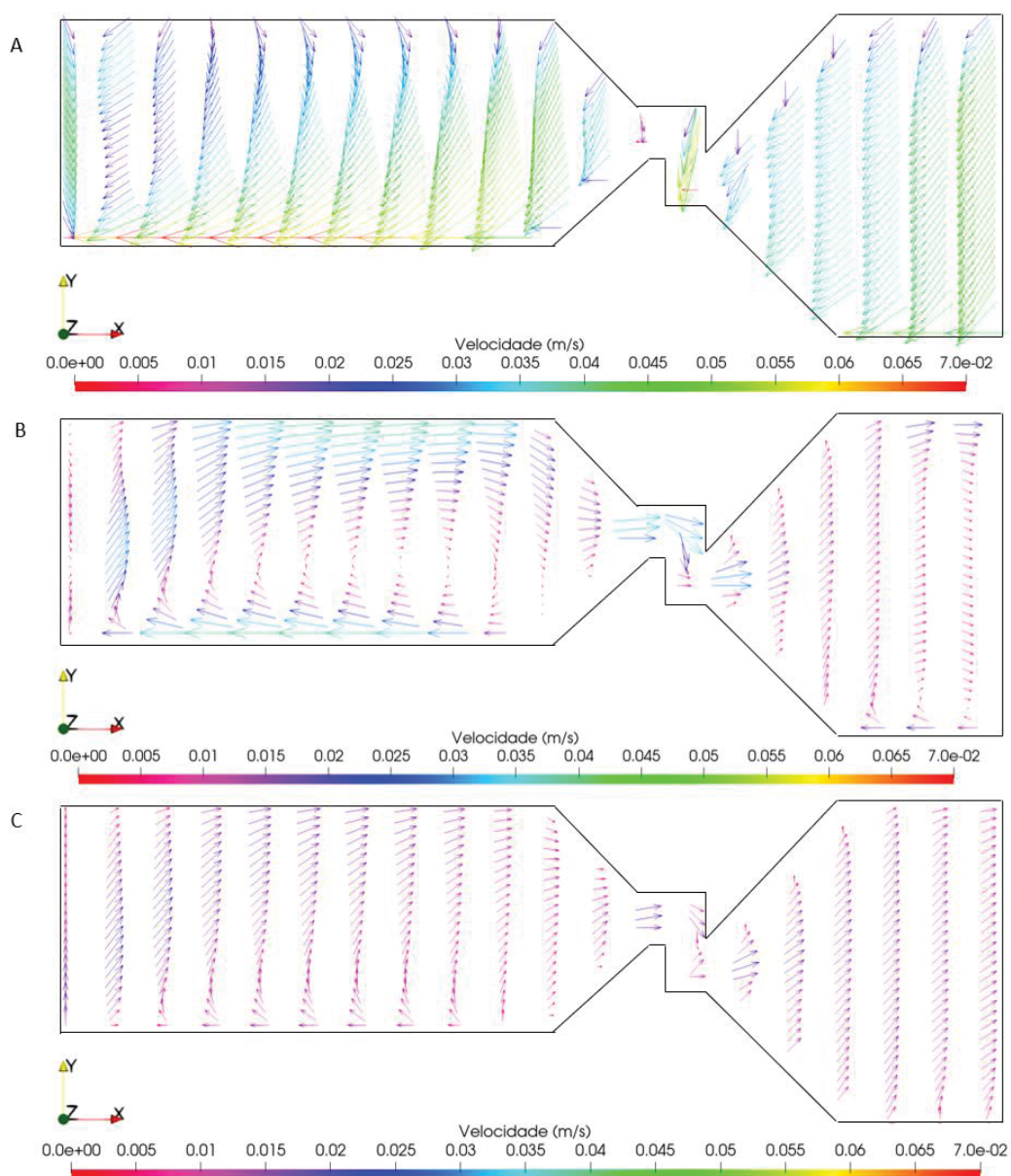
Simulação	Geometria	Q (m <sup>3</sup> /s)	$U_v$ (m/s)	$U_v$ (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	$W_s$ (m/s)	ERS (%)
11	G.02	3,0	5,0	SO-NL	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	75,98
17	G.02	3,0	5,0	NL-SO	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	68,83
38	G.02	3,0	5,0	SO-NL	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	19,96
35	G.02	3,0	5,0	NL-SO	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	19,00

Nota-se que ventos no sentido oblíquo ao escoamento geraram uma maior

complexidade hidrodinâmica no corpo hidrico, com recirculações verticais e horizontais mais intensas e com maiores amplitudes. Isso se refletiu em uma redução ainda maior dos valores de ERS, sugerindo que o efeito médio global desse aumento na complexidade do escoamento foi de prejudicar a deposição.

Para os ventos oblíquos, a redução de  $W_s$  em uma ordem de grandeza gerou uma redução entre 50% e 56% na ERS. Tal redução, embora ainda expressiva, foi menor do que aquelas observadas para os cenários sem vento e com vento longitudinal.

FIGURA 36 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , CONDIÇÃO COM VENTO (V5NLSO) E PARA A GEOMETRIA G.02 (A= SUPERFÍCIE, B=CENTRAL, C= LEITO)



Li et al. (2014) mencionaram que a incidência do vento na superfície de reservatórios auxilia no transporte de sedimentos para jusante, diminuindo sua deposição. Além disso, o aumento do cisalhamento na coluna de água gerado pelo vento tende a aumentar a difusão vertical turbulenta e o grau de mistura vertical, além de prejudicar a deposição (JIN et al., 2000). Um maior grau de mistura tende a reter uma parcela dos sedimentos por mais tempo no corpo hídrico (ZIEMINSKA-STOLARSKA et al., 2015). Contudo, nos casos simulados no presente estudo tal efeito foi menos importante, quanto ao impacto sobre a ERS, do que a tendência do aumento da turbulência no escoamento a prejudicar a deposição.

Com base nos resultados da TABELA 24, foi verificado novamente que a variação de  $W_s$  apresentou efeito significativo sobre a ERS, o que está de acordo com as observações de Paul e Putz (2008).

Analizando a resposta de ERS à variação da intensidade do vento ( $U_v$ ), para mesmas geometria, vazão, tipo de sedimento e direção do vento, observa-se que  $U_v$  e ERS são grandezas inversamente proporcionais: a redução da intensidade do vento oblíquo no sentido NL-SO de 5,0 m/s para 2,0 m/s gerou um aumento na ERS de 12,2%, conforme mostrado na TABELA 25.

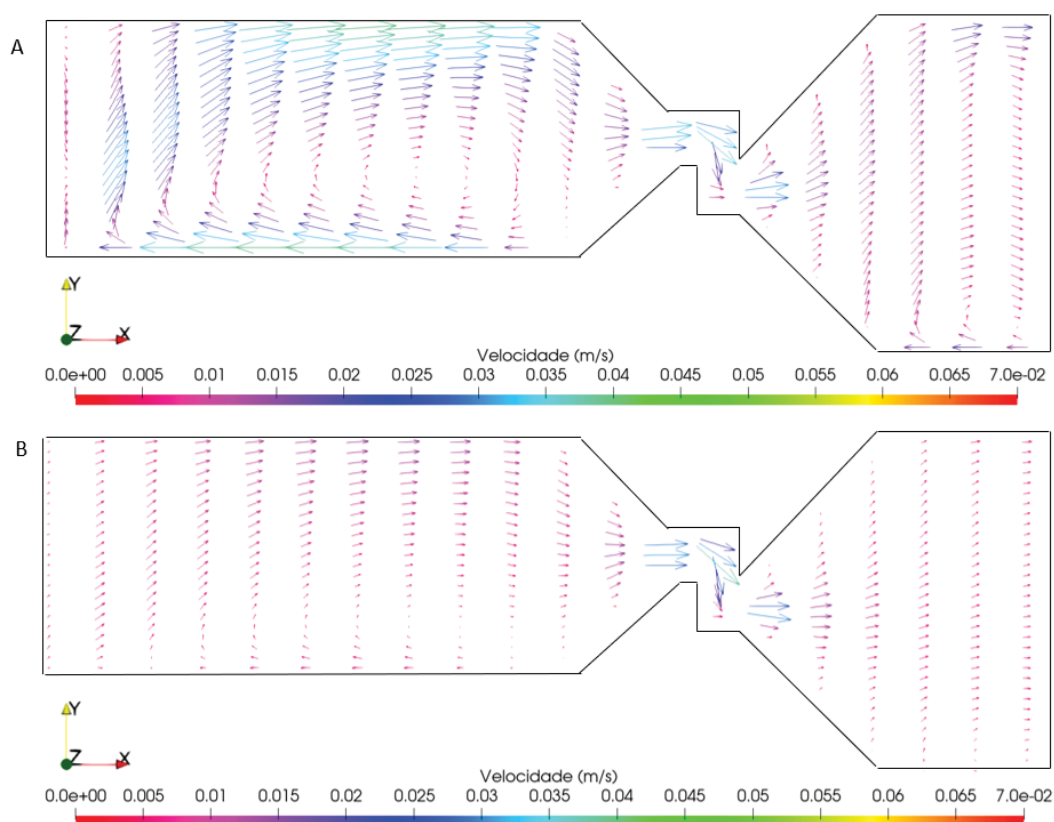
TABELA 25 – CONDIÇÕES E RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DO VENTO NA ERS

Simulação	Cenário	Q (m³/s)	$U_v$ (m/s)	$U_v$ (direção)	CSI- $C_{IN}$ (mg/L)	$W_s$ (m/s)	ERS (%)
17	G2	3,0	5,0	NL-SO	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	68,8
20	G2	3,0	2,0	NL-SO	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	81,0

Os padrões de escoamento para os ventos de intensidade 5,0 m/s e 2,0 m/s no sentido NL-SO apresentaram diferenças. Ao diminuir a intensidade do vento, nota-se que as intensidades das recirculações horizontais também diminuíram (FIGURA 37 A e B).

Com isso, entendeu-se que quanto menor a velocidade do vento oblíquo, menor foi o efeito médio global das recirculações sobre a retenção de sedimentos no corpo hídrico. Menores velocidades de escoamento em geral favoreceram a deposição de sedimentos e, conseqüentemente, resultaram em uma ERS maior. Em contrapartida, ventos oblíquos de maior intensidade tenderam a exacerbar o efeito de tais recirculações sobre a redução da ERS na região de estudo.

FIGURA 37 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA VAZÃO DE 3,0 m<sup>3</sup>/s, DA CAMADA CENTRAL DA CONDIÇÃO COM VENTOS V5NLSO (A) E V2NLSO (B), PARA A GEOMETRIA G.02



## 5.2 EFEITOS DO CONFINAMENTO PARCIAL

Os resultados obtidos para ERS em relação à mudança de geometria associada ao confinamento parcial de que trata este estudo são apresentados na TABELA 26.

TABELA 26 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA ERS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE VENTO.

Simulação	Geometria	Q (m <sup>3</sup> /s)	U <sub>v</sub> (m/s)	U <sub>v</sub> (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	W <sub>s</sub> (m/s)	ERS (%)
07	G.02	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	96,2
08	G.01	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	96,2
09	G.03	3,0	0,0	-	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	96,2
01	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	83,5
02	G.01	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	83,5
03	G.03	3,0	5,0	O-L	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	82,8
16	G.01	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	68,8
17	G.02	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	68,8
18	G.03	3,0	5,0	NL-SO	00-10	6,6x10 <sup>-5</sup>	52,6



Com base nos resultados da TABELA 26, nota-se que a ERS associada às geometrias G.01 e G.02 (com confinamento parcial) foi sempre igual ou superior ao valor de ERS correspondente para a geometria G.03 (sem confinamento).

Para a condição sem vento, a ERS foi de 96,2% nas três geometrias simuladas (simulações 07, 08 e 09). Portanto, nota-se que o confinamento parcial não exerceu efeito sobre a ERS na condição sem vento. Conforme mostrado nas FIGURAS 38 A, B e C e 39 A, B e C (geometrias G.01, G.02 e G.03, respectivamente), o escoamento não apresentou recirculações verticais e horizontais na região a montante da estação 01, ou seja, a região situada a montante do estreitamento de seção.

Para uma mesma seção situada em  $x$  igual a 500 m observa-se que as linhas de corrente são similares, independentemente da geometria. Sendo essas velocidades menores do que nas condições com vento, uma maior retenção de sedimentos ocorre, pois baixas velocidades em geral estão associadas a uma menor intensidade de difusão turbulenta.

Para as condições de vento no sentido longitudinal, a ERS foi de 83,5% para as geometrias G.01 e G.02, com confinamento parcial (simulações 01 e 02), valor ligeiramente superior à ERS de 82,8% associada à geometria G.03 (simulação 03), sem confinamento. O escoamento apresenta recirculações no plano horizontal a montante do canal de ligação nas geometrias G.01 e G.02 (FIGURA 40 A e B), mas não na geometria G.03 (FIGURA 40 C).

Observa-se também que no plano longitudinal XZ ocorreram recirculações verticais a montante do estreitamento de seção, sendo que apenas o escoamento das camadas próximas à superfície foi contínuo, transpassando para jusante do canal de ligação (FIGURAS 41 A e B). Essa recirculação mostrou que houve uma descontinuidade hidrodinâmica causada pelo confinamento parcial, para tais condições de vazão e vento. Tal descontinuidade é aqui entendida como padrões de escoamento a montante do canal de ligação não sendo transferidos, com a mesma intensidade, para jusante do mesmo, ou vice versa. Esse efeito não foi verificado na geometria G.03, sem confinamento, associada a regiões de transição rio-reservatório com alargamento gradual monotônico do corpo de água. Tal efeito é menos expressivo do que seria verificado em uma condição correspondente de confinamento total – tipicamente associada ao uso de barramento – mas não foi desprezível, nas condições aqui analisadas. Entende-se, com isso, que o grau de

confinamento de uma região de transição pode exercer influência importante sobre as características hidrossedimentológicas do reservatório.

Para geometria G.03, logo após o alargamento de seção, observa-se uma zona morta na seção central do corpo hídrico (FIGURA 40 C) . Isso ocorreu pela inversão do sentido do escoamento no plano longitudinal-vertical XZ (FIGURA 41 C), sendo a camada superficial de direção oeste para leste, e a camada próximo ao leito de direção leste para oeste. Como a FIGURA 40 C se trata de uma vista da camada central do corpo hídrico, a mudança de direção do escoamento ocasionou velocidades nulas na porção central do reservatório.

FIGURA 38 - CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO PARA CONDIÇÃO SEM VENTO E VAZÃO 3,0 m<sup>3</sup>/s PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C)

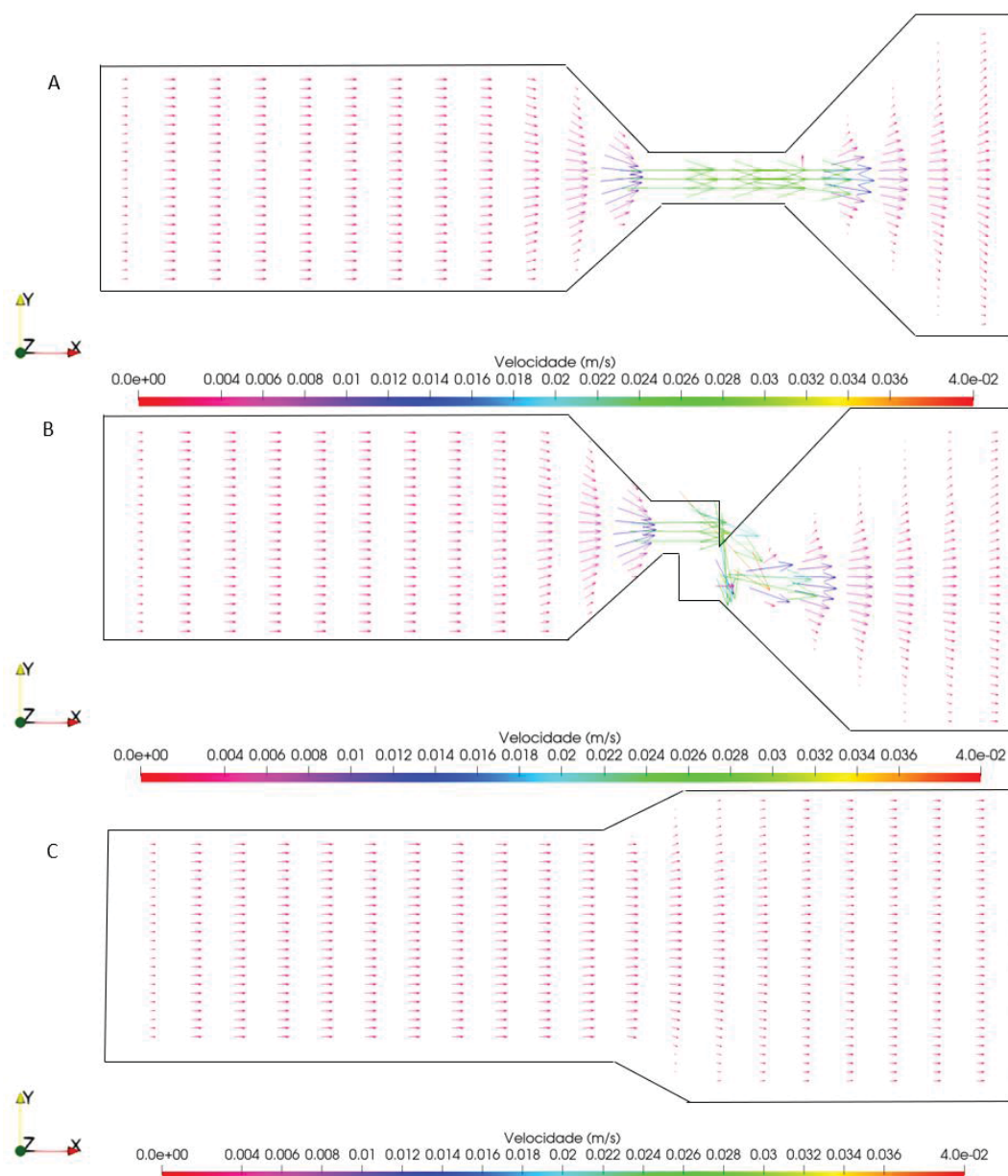
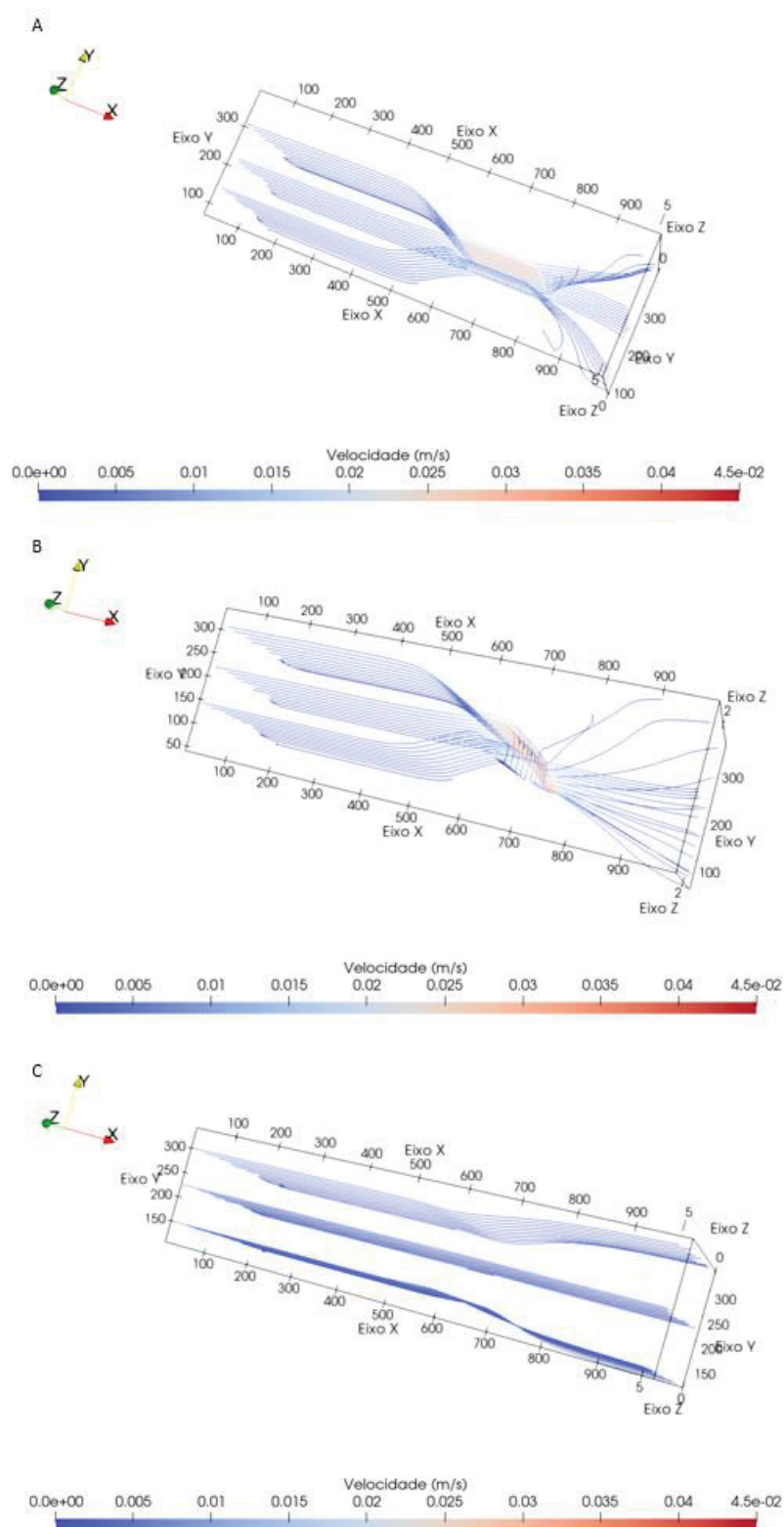


FIGURA 39 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO EM VISTA 3D PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  E SEM VENTO PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C)



Para a geometria G.03 os padrões recirculação longitudinal-vertical não apresentam descontinuidade hidrodinâmica, sendo apenas intensificados pelas



condições de vento (FIGURA 43 A e B). Essas mudanças nos padrões de circulação tiveram o efeito médio global de aumentar a ERS na região parcialmente confinada, provavelmente por concentrar partículas de sedimento sofrendo deposição por mais tempo no interior da região confinada.

O efeito do confinamento parcial sobre a ERS também foi investigado com base em simulações com ventos oblíquos ao eixo oeste-leste do escoamento. No caso, foram simulados ventos nos sentidos sudoeste-nordeste (SONL) e nordeste-sudoeste (NLSO), com a intensidade de 5 m/s em ambos os sentidos e 2 m/s no sentido NLSO. Nas geometrias G.01 e G.02, com confinamento parcial (simulações 16 e 17), a ERS foi de 68,8%, valor superior em 16,2% comparado à geometria G.03, sem confinamento (simulação 18), para a qual a ERS foi de 52,6%. Uma justificativa para essas variações seriam o padrão de escoamento na seção a montante do canal de ligação (FIGURA 42 A, B e C).

No plano longitudinal-vertical (XZ), as três geometrias apresentam formação de vórtices nas três camadas avaliadas, com aumento de amplitude devido ao aumento da intensidade do vento (FIGURAS 43 A, 44 A e 45 A).

As FIGURAS 43 B, 44 B e 45 B mostram que a incidência do vento na direção oblíqua ao escoamento gerou um padrão de recirculação vertical no mesmo sentido que pode transpassar por todo corpo hídrico (geometria G.03) ou ser interrompido devido ao confinamento parcial (geometrias G.01 e G.02). Recirculações envolvendo todas as direções foram recorrentes nesses cenários. Em relação à condição correspondente sem vento, o aumento da advecção de parte do fluxo diminuiu o tempo de residência de uma parcela do aporte sólido ao reservatório. Contudo, outra parcela dele, retida em recirculações, teve esse tempo aumentado. A ação combinada do aumento da advecção e do grau de turbulência no escoamento apresentaram dominância sobre os resultados de ERS, nos cenários com ventos oblíquos, em relação ao aumento no tempo de retenção de parcela do aporte sólido retido em recirculações. Porém, a descontinuidade hidrodinâmica causada pelo estreitamento de seção a montante do canal de ligação das geometrias G.01 e G.02 refletiu-se em uma maior ERS, comparado à geometria G.03, para uma mesma condição de vento oblíquo.

FIGURA 40 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA CAMADA CENTRAL PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  E VENTO LONGITUDINAL V50L PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C)

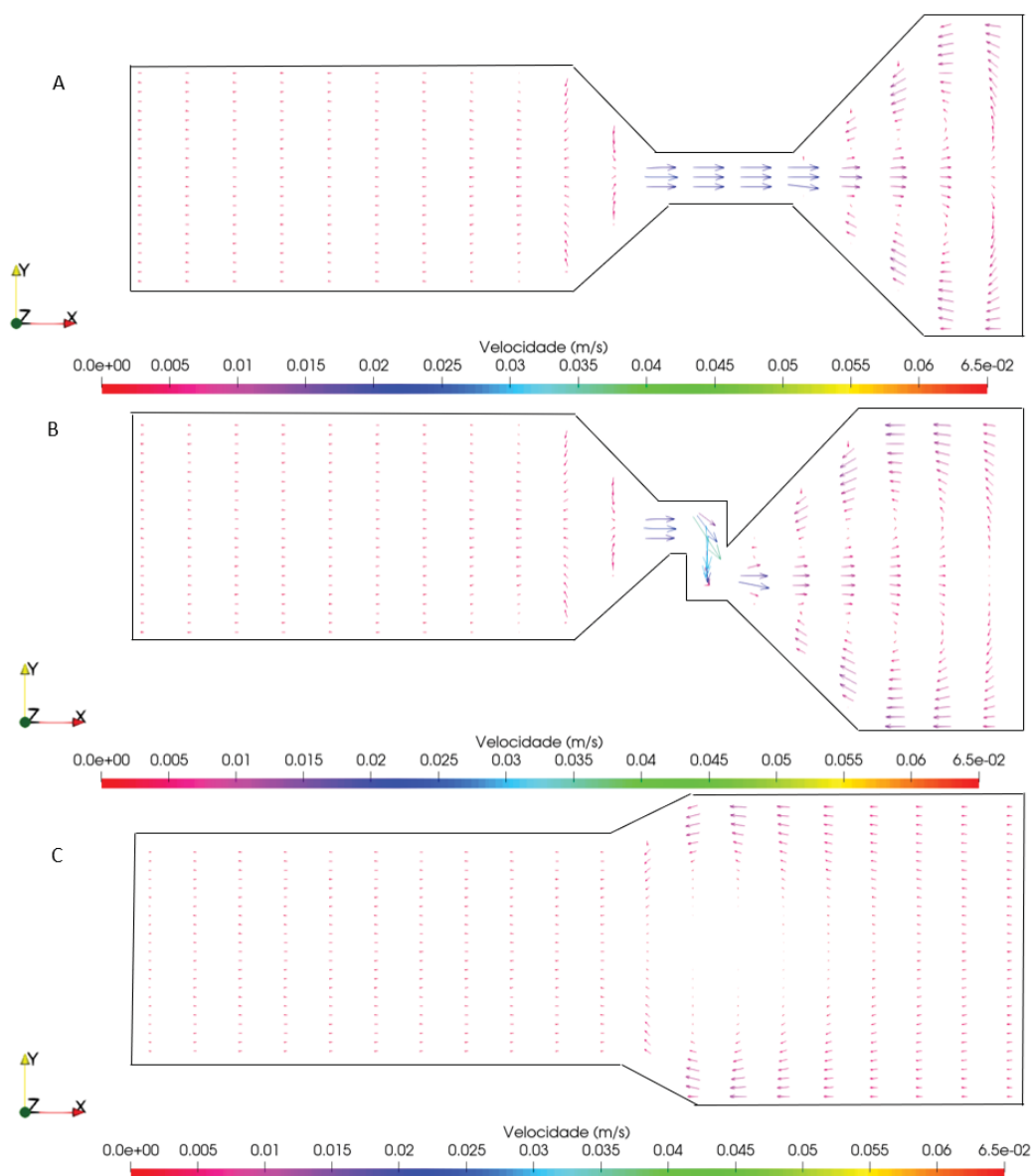


FIGURA 41 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ, AO LONGO DO EIXO DE SIMETRIA, PARA GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C), PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  E VENTO V50L

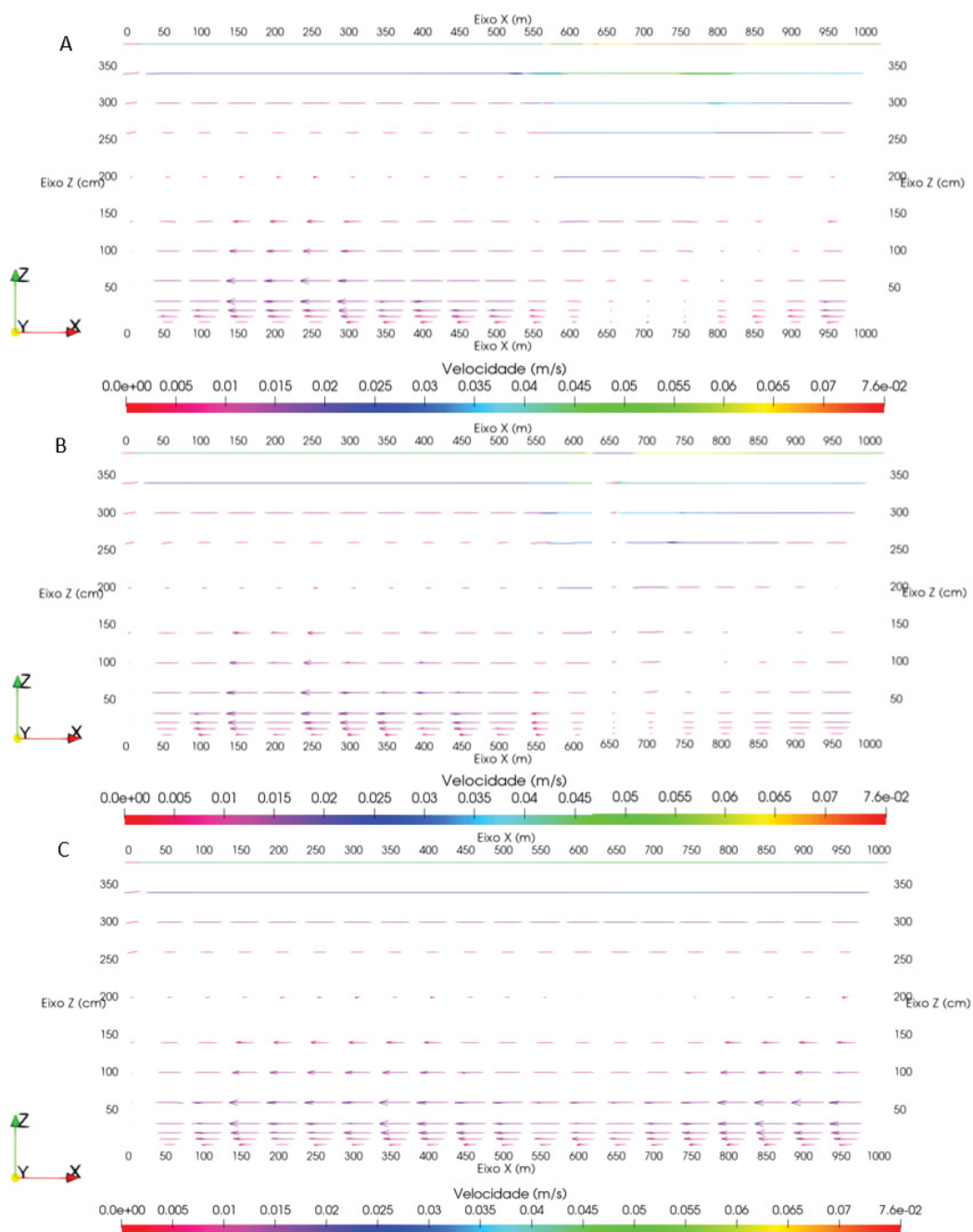


FIGURA 42 – CAMPO DE VELOCIDADE DO ESCOAMENTO NA CAMADA CENTRAL PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  E VENTO OBLÍQUO V5NLSO PARA AS GEOMETRIAS G.01 (A), G.02 (B) E G.03 (C)

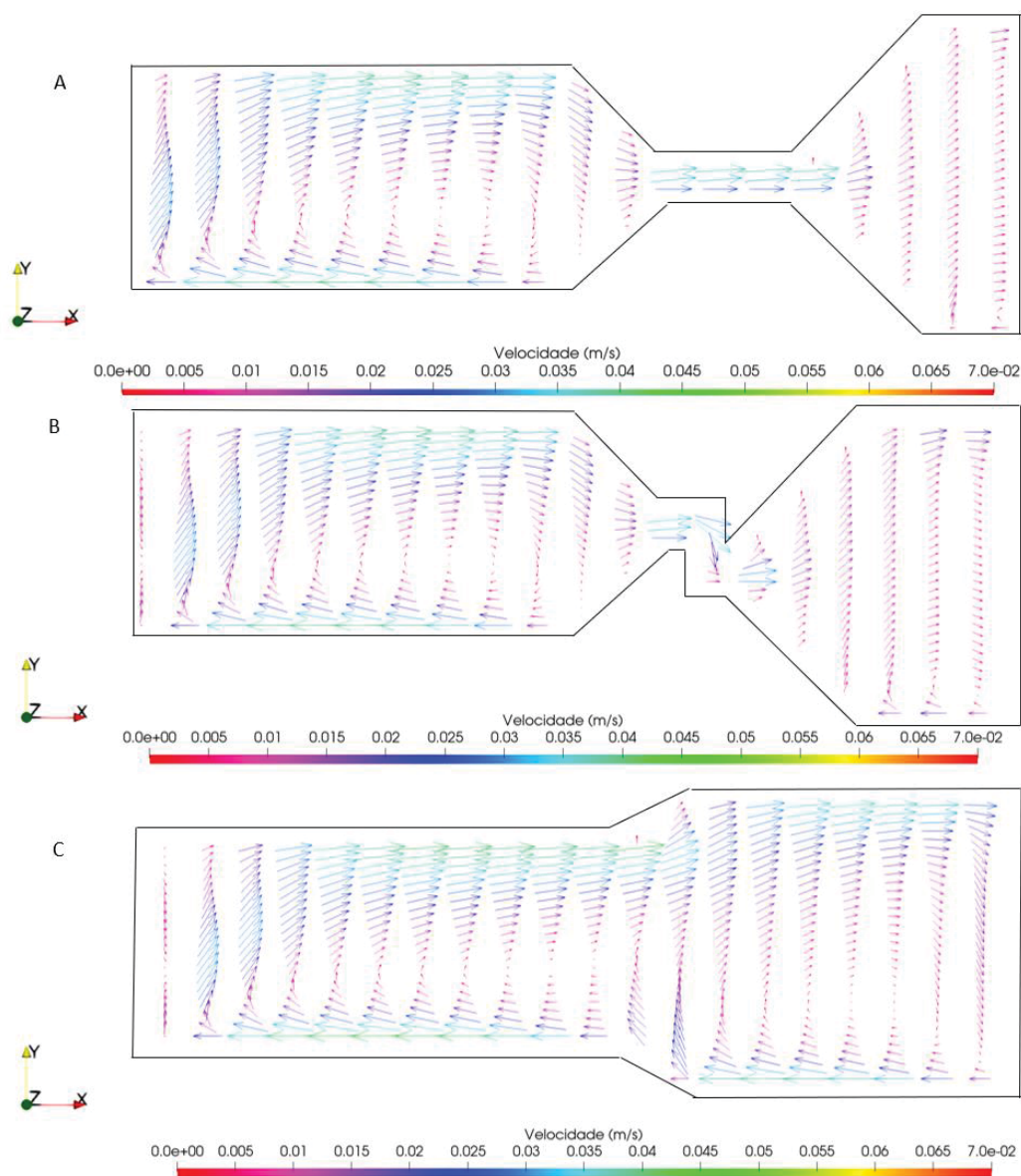


FIGURA 43 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ (A) E VISTA 3D (B) PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , VENTO OBLÍQUO V5NLSO PARA A GEOMETRIA G.01.

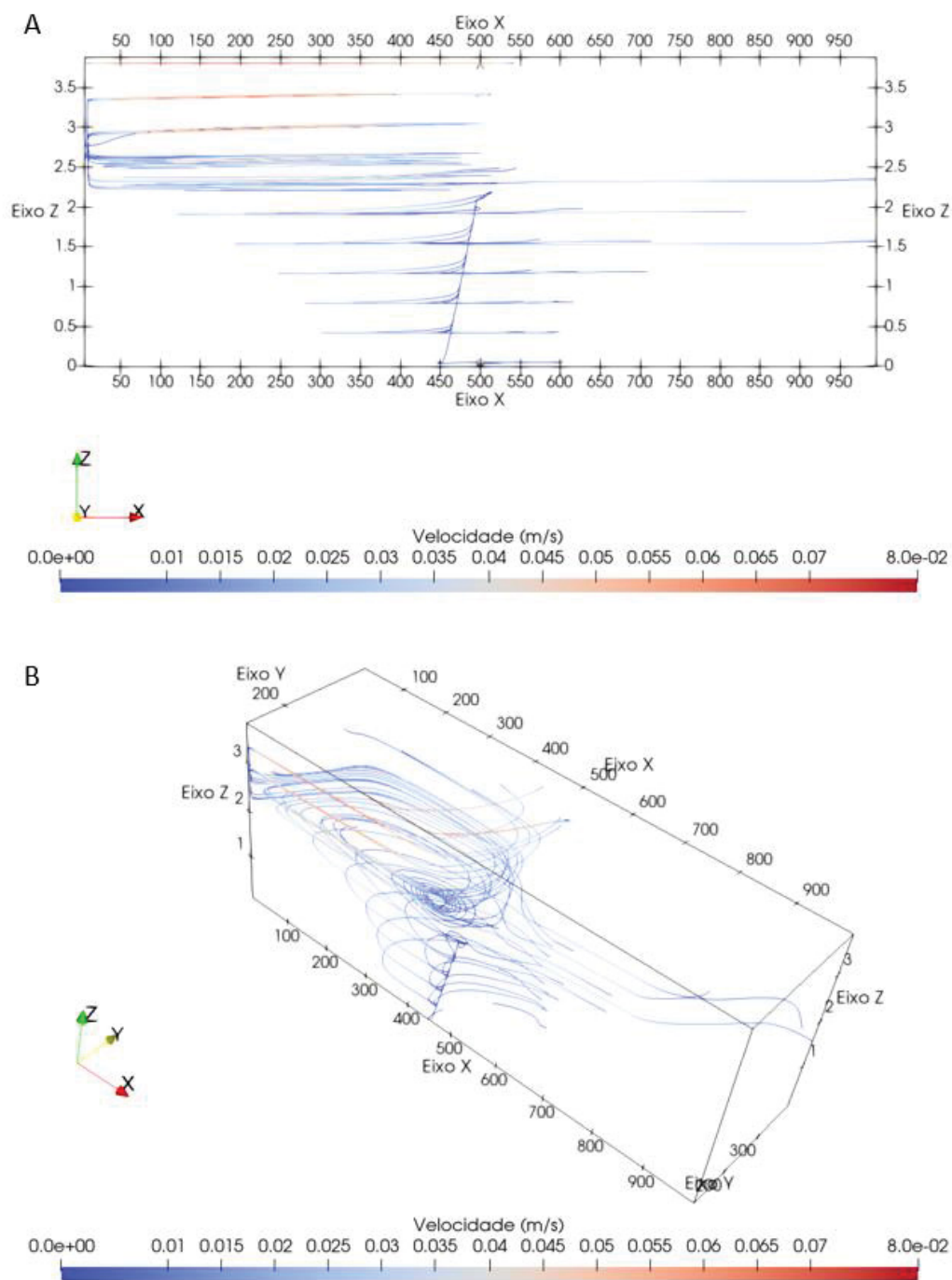


FIGURA 44 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ (A) E VISTA 3D (B) PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , VENTO OBLÍQUO V5NLSO PARA A GEOMETRIA G.02.

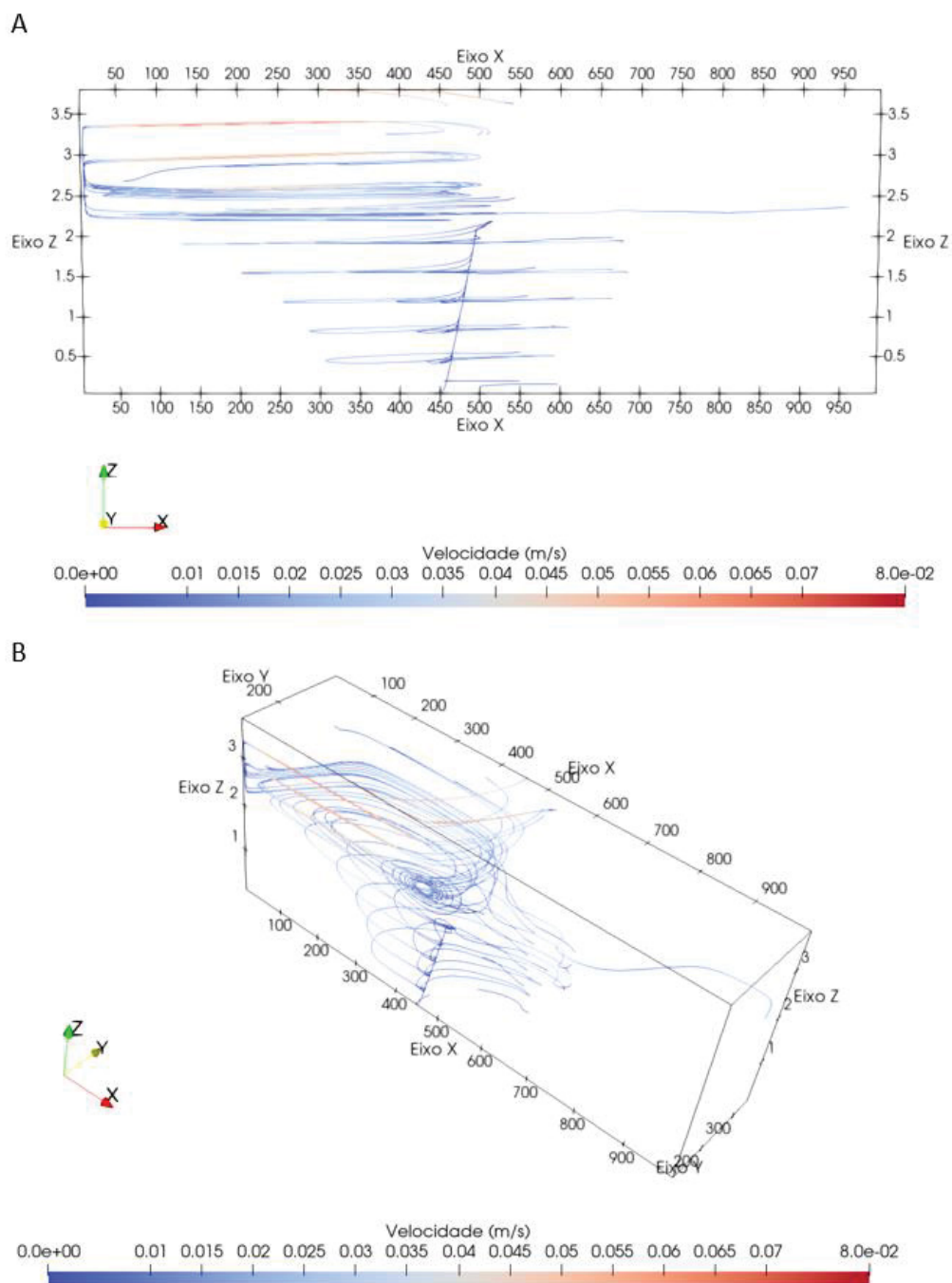
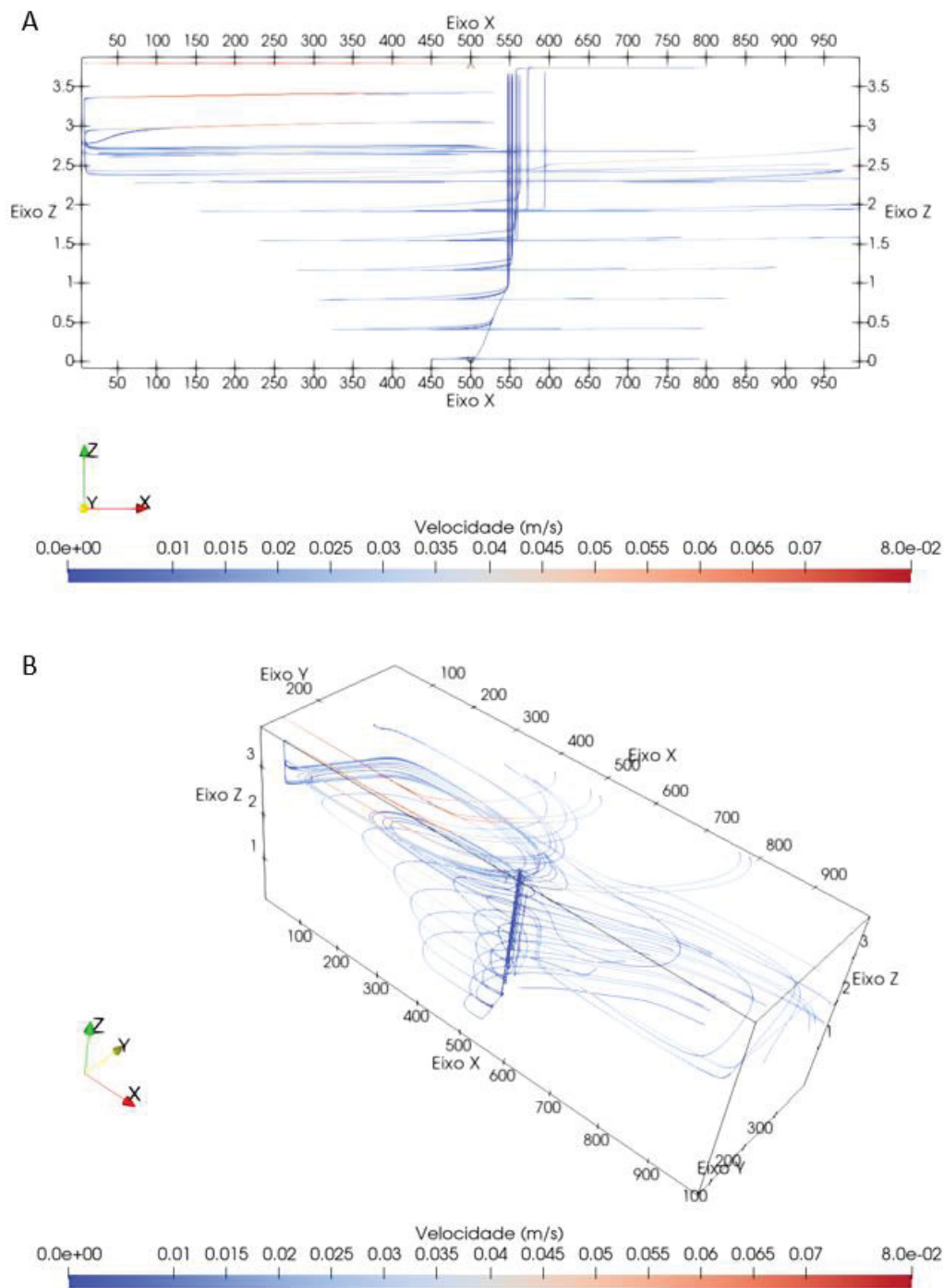




FIGURA 45 – LINHAS DE CORRENTE DO ESCOAMENTO LONGITUDINAL XZ (A) E VISTA 3D (B) PARA CONDIÇÃO DE VAZÃO  $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , VENTO OBLÍQUO V5NLSO PARA A GEOMETRIA G.03.



A fim de analisar a influência da sinuosidade do canal de ligação, foram comparados os resultados obtidos para as geometrias G.01 e G.02 para diferentes vazões (TABELA 27). Para as vazões de  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , notou-se uma sutil diferença na ERS entre as geometrias G.01 (com canal de ligação retilíneo) (simulações 57 e 61, respectivamente) e G.02 (com canal de ligação sinuoso) (simulações 55 e 62, respectivamente). A sinuosidade do canal de ligação causou um ligeiro aumento no valor da ERS, o que foi associado a um grau de confinamento ligeiramente superior àquele proporcionado pela geometria com canal retilíneo, e tal efeito tendeu a aumentar com a redução da importância relativa da vazão fluvial sobre o padrão de escoamento na região estudada.

TABELA 27 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA ERS PARA AS VAZÕES  $Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  E  $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , VENTO V5LO E  $W_s = 6,6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

Simulação	Geometria	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$U_v$ ( $\text{m/s}$ )	$U_v$ (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> ( $\text{mg/L}$ )	$W_s$ ( $\text{m/s}$ )	ERS (%)
60	G.01	0,1	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	95,86
61	G.02	0,1	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	95,93
54	G.01	1,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	92,67
56	G.02	1,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	92,69
05	G.01	3,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	82,15
04	G.02	3,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-5}$	82,15

Ao analisar o escoamento no eixo longitudinal do reservatório nota-se diferenças nos padrões de circulação. Para geometria G.01 a recirculação vertical é mantida ao passar pelo canal retilíneo, transportando maior quantidade de sedimentos. Para geometria G.02 a recirculação vertical é quebrada ao entrar no canal sinuoso, retendo por mais tempo uma parcela dos sedimentos na região parcialmente confinada.

Observa-se que, ao diminuir a vazão, a diferença entre valores de ERS entre as geometrias aumentam. Para a menor vazão simulada a ERS foi 0,07% menor com o canal retilíneo, sendo ela de 95,86% para a geometria G.01 (simulação 61) e 95,93% para a geometria G.02 (simulação 62). Desse modo, não foi detectado um efeito significativo da sinuosidade do canal de ligação..

Para os cenários simulados com velocidade de queda  $W_s = 6,6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , observou-se que o confinamento parcial também tendeu a aumentar a ERS em cenários com a incidência de ventos oblíquos, conforme mostrado na TABELA 28.



Contudo, nos casos de vento longitudinal (sentidos OL e LO) com tal valor de  $W_s$ , o confinamento parcial tendeu a causar ligeira redução na ERS, de até 1,7% nos casos analisados. Para tal condição de vento, entendeu-se que a ausência de recirculações na geometria G.03 (sem confinamento) favoreceu uma maior deposição de sedimentos na região de estudo. Além disso, comparando-se resultados de ERS obtidos para as geometrias G.01 e G.02, notou-se que a sinuosidade do canal de ligação tendeu a aumentar ligeiramente a ERS, em até 1,2% (caso do vento no sentido LO). Observa-se que esse efeito ocorreu apenas para as condições quem que os ventos foram longitudinais em relação ao eixo do reservatório. Para ventos oblíquos, a ERS manteve o padrão verificado nas simulações realizadas com maior velocidade de queda do sedimento, ou seja, o confinamento parcial teve o efeito de aumentar a ERS em cenários com vento.

TABELA 28 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA ERS PARA  $W_s = 6,6 \times 10^{-6}$  m/s

Simulação	Geometria	Q (m³/s)	$U_v$ (m/s)	$U_v$ (direção)	CSI-C <sub>IN</sub> (mg/L)	$W_s$ (m/s)	ERS (%)
26	G.01	3,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	20,9
25	G.02	3,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	21,5
27	G.03	3,0	5,0	O-L	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	22,0
32	G.01	3,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	20,2
31	G.02	3,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	21,4
33	G.03	3,0	5,0	L-O	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	21,9
34	G.01	3,0	5,0	NL-SO	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	19,0
35	G.02	3,0	5,0	NL-SO	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	19,0
36	G.03	3,0	5,0	NL-SO	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	12,5
37	G.01	3,0	5,0	SO-NL	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	20,0
38	G.02	3,0	5,0	SO-NL	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	20,0
39	G.03	3,0	5,0	SO-NL	00-10	$6,6 \times 10^{-6}$	13,6

## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Uma gama de medidas podem ser empregadas para mitigação e controle do assoreamento em reservatórios. Entre essas técnicas está o uso de pré-reservatórios para a retenção controlada e localizada de parte do aporte sólido fluvial, a montante do reservatório principal. Esse estudo testou a hipótese de que regiões de transição rio-reservatório podem exercer efeito similar ao de pré-reservatórios se estiverem sujeitas a um confinamento parcial, sob determinadas condições hidrossedimentológicas. Simulações computacionais 3D da hidrodinâmica e do transporte e deposição de sedimentos coesivos suspensos foram utilizadas para calcular a eficiência de retenção de sedimentos (ERS) de uma região idealizada de transição rio-reservatório sob três cenários geométricos: não-confinada, confinada por meio de estreitamento com canal de ligação retilíneo e confinada com canal de ligação sinuoso. Foram avaliadas condições de regime permanente hidrossedimentológico sob variações de vazão fluvial, concentração afluente de sedimentos, velocidade de sedimentação e vento (intensidade e direção).

Em cada condição de simulação, a ausência de vento levou as três geometrias a apresentarem o mesmo valor de ERS; com vento longitudinal ao eixo do corpo de água, as geometrias parcialmente confinadas apresentaram ERS ligeiramente superior à da geometria não-confinada; e, com vento oblíquo ao eixo do corpo de água, as geometrias parcialmente confinadas apresentaram ERS substancialmente superior à da geometria não-confinada. Tal efeito foi explicado com base em alterações dos padrões de recirculação nos planos horizontal e vertical do escoamento, na medida em que foram interrompidos pelo estreitamento do corpo de água associado ao confinamento parcial. Uma pequena redução da ERS foi observada em apenas um dos cenários simulados.

Concluiu-se que tal região idealizada de transição submetida a um confinamento parcial conforme aqui considerado possa exercer efeito similar ao de um pré-reservatório, com efeito prático potencialmente relevante de aumentar a retenção localizada de sedimentos, especialmente, no caso de elevado aporte sólido fluvial a reservatórios sob alto risco de assoreamento.

Estudos futuros podem ampliar a investigação de tal efeito sob uma faixa mais ampla de condições hidrossedimentológicas e geométricas. Condições reais em reservatórios poderão ser contempladas em estudos de casos que contem com

dados de campo adequados para calibração e validação das simulações computacionais. Também podem ser considerados processos erosivos ocorrendo simultaneamente em partes do corpo de água (como regiões mais rasas durante cheias), estratificação térmica, correntes de densidade, descarga sólida de fundo, ondas na superfície e outros tipos de confinamento, como por exemplo o ocasionado por barramento e/ou outras razões de estreitamento do corpo de água.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **A Evolução da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília; ANA, 2002.

BARROCA, N. A. **Simulação de fluxos de fluidos em meios porosos desordenados. Uma análise de efeito de escala na estimativa da permeabilidade e do coeficiente de arrasto**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

BOGEN, J. The impact of environmental changes on the sediment loads of Norwegian rivers. **Catena**, v. 79, p. 251–256, 2009.

BOTELHO, D.A. ESTIGONI, M. V.; TEAKLE, I. A. L.; MIRANDA, R. B.; VERONEZ, O.; MAUAD, F. F. Modelagem de transporte de sedimentos coesivos parte 2: Testes de deposição. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 1 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 1994

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2000.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos** – fundamentose aplicações. Porto Alegre: AMGH, 2012.

CHAO, X.; JIA, Y.; SHIELDS, F. D.; WANG, S. S.; COOPER, C. M. Three-dimensional numerical modeling of cohesive sediment transport and wind wave impact in a shallow oxbow lake. **Advances In Water Resources**, [s.l.], v. 31, n. 7, p.1004-1014, jul. 2008. Elsevier BV.

CHEN, D.; WANG, Y.; MELVILLE, B.; HUANG, H.; ZHANG, W. Unified Formula for Critical Shear Stress for Erosion of Sand, Mud, and Sand–Mud Mixtures. **Journal Of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 8, ago. 2018

CHEN, B.; WANG, K. Suspended Sediment Transport in the Offshore near Yangtze Estuary. **Journal of Hydrodynamics, Ser B**, v.20, n 3, p. 373-381, jun. 2008

CHITALE, S. V.; SINHA, S.; MISHRA, P. K. Estimation of delta profile in the Indravati Reservoir. **Journal Of Hydraulic Engineering**. v. 124, n. 1, p.109-113, jan. 1998.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por Barragens. **Caminhos da Geografia**, v.9, n.26, p. 16-32, jun. 2008

COKER, E.H.; HOTCHKISS, R.; JOHNSON, D.A. Conversion of a Missouri river dam and reservoir to a sustainable system: Sediment management. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, 815-527, 2009.

COLE, T.M. e WELLS, S A. (2008). **CE–QUAL–W2: A Two Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model**, Version 3.6. User's manual., Washington, DC, E.U.A., 715.

DAI, S.B.; LU, X.X.. Sediment deposition and erosion during the extreme flood events in the middle and lower reaches of the Yangtze River. **Quaternary International**, v. 226, n. 1-2, p.4-11, out. 2010.

DELTARES. User Manual Delft3D. **Simulation of multi-dimensional hydrodynamic and transport phenomena, including sediments**. Delft: The Netherlands. 2014.

DIAS, L. N. **Estudo integrado da bacia hidrográfica do reservatório Passaúna (Araucária-Paraná-Brasil), considerando a inter-relação da ocupação dos solos com a qualidade de água**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

DU, P.; DING, P.; HU, K. Simulation of three-dimensional cohesive sediment transport in Hangzhou Bay, China. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 29, n. 2, p.98-106, mar. 2010.

ELHAKEEM, A.; ELSHORBAGY, W.; BLENINGER, T. Long-term hydrodynamic modeling of the Arabian Gulf. **Marine Pollution Bulletin**, v. 94, n. 1-2, p.19-36, maio 2015.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FISCHER, H. B.; LIST, E. J.; BROOKS, N. H. **Mixing in Inland and Coastal Waters**. San Diego: Academic Press, 1979.

FOX, R.W.; McDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GAILANI, J.; ZIEGLER, C. K.; LICK, W. Transport of Suspended Solids in the Lower Fox River. **Journal Of Great Lakes Research**, [s.l.], v. 17, n. 4, p.479-494, jan. 1991

GARCIA, G. E. **Implementação de modelo numérico para avaliação do transporte de sedimentos no reservatório de Itaipu – PR**. 2008. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GRAF, W. H. **Hydraulics of Sediment Transport**. Chelsea: WRP, 1984.

GU, L.; ZHU, D. Z.; HUA, Z.; LIU X.; DUIN, B.; MAHMOOD, K. Sediment modelling and design optimization for stormwater ponds. **Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques**, [s.l.], v. 42, n. 1, p.70-87, 10 ago. 2016. Informa UK Limited.

HAUN, S.; KJÆRÅS, H.; LØVFALL, S.; OLSEN, N. R. B. Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir. **Journal Of Hydrology**, v. 479, p.180-188, fev. 2013.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New York: MacMillan, 1966.

Hervouet, J. M. (2000). TELEMAC modelling system: an overview. **Hydrological Processes**, 14(13), 2209-2210.

HYDROQUAL, I.; **A primer for ECOMSED**, User's manual. Version 1.3. New Jersey: HydroQual, 2002

IAP – Instituto Ambiental do Paraná. **Qualidade das águas dos reservatórios do Estado do Paraná**. Curitiba, 2017

JIN, K.; HAMRICK, J. H.; TISDALE, T. Application of Three-Dimensional Hydrodynamic Model for Lake Okeechobee. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 126, n. 10, p.758-771, out. 2000. American Society of Civil Engineers (ASCE)

KANTOUSH, S; A SCHLEISS,. Influence of geometry shape factor on trapping and flushing efficiencies. **Reservoir Sedimentation**, [s.l.], p.129-137, 12 ago. 2014.

KITWARE. **The ParaView Guide**. Community Edition. Updated for Paraview version 5.6. 2019

KOÇYIGIT, M. B.; FALCONER, R. A.. Modelling of wind-induced currents in water basins. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Water Management**, [s.l.], v. 157, n. 4, p.197-210, dez. 2004. Thomas Telford Ltd.

KONDOLF, G. M.; GAO, Y.; ANNANDALE, G. W.; MORRIS, G. L.; JIANG, E.; ZHANG, J.; CAO, Y.; CARLING, P.; FU, K.; GUO, Q. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. **Earth's Future**, v. 2, n. 5, p.256-280, maio 2014.

KONDOLF, G. M.; SCHMITT, R. J. Dams, sediment discontinuity, and management responses. **Reservoir Sedimentation**, 2018.

KUMAR, S. Sathish; BALAJI, R.. Effect of bottom friction on tidal hydrodynamics along Gulf of Khambhat, India. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, [s.l.], v. 154, p.129-136, mar. 2015

LAI, Y. G.; HUANG, J.; WU, K. Reservoir Turbidity Current Modeling with a Two-Dimensional Layer-Averaged Model. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 141, n. 12, dez. 2015.

LI, G.; XUE, X.; LIU, Y.; WANG, H.; LIAO, H. Diagnostic experiments for transport mechanisms of suspended sediment discharged from the Yellow River in the Bohai Sea. **Journal Of Geographical Sciences**, v. 20, n. 1, p.49-63, fev. 2010.

LUO, J.; LI, M.; SUN, Z.; O'CONNOR, B. A. Numerical modelling of hydrodynamics and sand transport in the tide- dominated coastal-to-estuarine region. **Marine Geology**, v. 342, p.14-27, ago. 2013.

MAITELLI, C. W. S. P. **Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrifugada utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MAMIZADEH, J. Experimental study of reservoir entrance angle and hydraulic-sediment properties on rate of delta progression. **Journal of Civil Engineering**, v. 41, p. 13-19, 2013.

MARCON, L. **High temporal resolution measurement of ebullition in a subtropical reservoir**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**: Planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

MAYERLE, R.; NARAYANAN, R.; ETRI, T.; WAHAB, A. K. A. A case study of sediment transport in the Paranagua Estuary Complex in Brazil. **Ocean Engineering**, v. 106, p.161-174, set. 2015.

MEGER, D.G. **Material particulado suspenso e macroconstituintes iônicos em um reservatório de abastecimento: O caso do rio Passaúna, Curitiba, Paraná, Brasil**. 2007. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) – Pós Graduação em Gestão Ambiental. Centro Universitário Positivo, Curitiba, 2007.

MORILLO, S.; IMBERGER, J.; ANTENUCCI, J. Modifying the residence time and dilution capacity of a reservoir by altering internal flowpaths. **International Journal Of River Basin Management**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.255-271, dez. 2006. Informa UK Limited.

MORRIS, G. L.; J. FAN. **Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1998.

NASCIMENTO, A. P. **Estimativa da Carga de Lavagem Transportada pelo Rio Atibaia, SP**. 2001. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NICHELE, V. H.; RAUEN, W. B. **Modelagem computacional tridimensional do transporte de sedimentos na região de confluência entre o rio Passaúna e seu reservatório**. 2018. Relatório Final – Programa de Iniciação Científica. Universidade Positivo, Curitiba.

OMER, A. Y. A.; ALI, Y. S. A.; ROELVINK, J. A.; DASTGHEIB, A.; PARON, P.; CROSATO, A. Modelling of sedimentation processes inside Roseires Reservoir (Sudan). **Earth Surface Dynamics**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.223-238, 2 abr. 2015.

PAUL, L.; PUTZ, K. Suspended matter elimination in a pre-dam with discharge dependent storage level regulation. **Limnologica**, 38, 388-399, 2008.

PEIXOTO R.S.; ROSMAN, P.C.C.; VINZON, S.B. 2017. A morphodynamic model for cohesive sediments transport. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22(57), 1-13.

MENDES, A. B. **Sediment Cálculo do Assoreamento de Reservatórios: manual do usuário**: versão 1.1. 2005b

PITRAT, D. M. J. J. **Avaliação da contaminação por metais em rios: Estudo de caso da Bacia do rio Passaúna**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de



Recursos Hídricos e Ambiental) – Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

QIAO, L.L.; WANG, Y. Z.; LI, G. X.; DENG, S. G.; LIU, Y.; MU, L. Distribution of suspended particulate matter in the northern Bohai Bay in summer and its relation with thermocline. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, v. 93, n. 3, p.212-219, jul. 2011.

RAUEN, W. B.; OLIVEIRA, C. M. R.; KNAPIK, H. G.; FERNANDES, C. V. S.; BLENINGER, T. B.; SCHEER, M. **Investigação dos efeitos de delta e buffer no reservatório do rio Passaúna, Curitiba, PR**. Projeto de pesquisa submetido à Universidade Positivo / Centro de Pesquisa da Universidade Positivo, 2016.

RAUEN, W. B.; CASTRO, C. O.; SILVA, M. G. **Caracterização hidrossedimentológica do rio Passauna, PR, Brasil, a partir de dados históricos**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 2017.

RAUEN, W. B.; SILVA, M.G; HILGERT, S.; SOTIRI, K.; KNAPIK, H. G.; FERNANDES, C. V. S.; DZIEDZIC, M.; SCHEER, M. B.; BLENINGER, T. **Avaliação do assoreamento em reservatórios: análise crítica com base em reservatório de abastecimento público em região urbanizada**. In: XIII ENES & I PiA (Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos & Particles in the Americas), Vitória, 2018.

RUEDA, F.; MORENO-OSTO, E.; ARMENGOL, J. The residence time of river water in reservoirs. **Ecological Modelling**, [s.l.], v. 191, n. 2, p.260-274, jan. 2006. Elsevier BV

SAUNITI, R. M.; FERNANDES, L. A.; BITTENCOURT, A. V. L. **Estudos do Assoreamento do Reservatório da Barragem do Rio Passaúna – Curitiba – PR**. Editora UFPR. Boletim Paranaense de Geociências, n.54, p.65-82, 2004.

SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; CESARE, G. Reservoir sedimentation. **Journal Of Hydraulic Research**, v. 54, n. 6, p.595-614, 20 set. 2016.

SEWAMA. **Abordagens inovadoras para a future gestão de sedimentos e da água no Brasil**. 2017. Disponível em: <<http://www.nopa-brasil.net/pt/sewama.html>>. Acesso: 10 nov. 2017.

SHAW, J. B.; MOHRIG, D. The importance of erosion in distributary channel network growth, Wax Lake Delta, Louisiana, USA. **Geology**, v. 42, n. 1, p.31-34, nov. 2013. Geological Society of America.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4 ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA, M. G.; RAUEN, W. B. **Estudo do Assoreamento de um Reservatório para Abastecimento de Água de Curitiba**. EPIC, UP, 2017.

SILVA, R. C. V. da; WILSON JÚNIOR, G. **Hidráulica Fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, vol. 2, 2005.

SIQUEIRA, A. C. **Avaliação do assoreamento do reservatório de abastecimento de água do rio Passaúna**. TCC em Engenharia Civil, UP, 2014.



SUDERHSA – **Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**. Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba: Relatório final, vol.4, dez 2002.

TEIXEIRA, E.C.; RAUEN, W.B. 2020. **Hydrodynamic Design and Assessment of Water and Wastewater Treatment Units**. Boca Raton: CRC Press / Taylor & Francis. 118 p.

US Army Corps of Engineers. **HEC-RAS**. Hydraulic Reference Manual. EUA, 2010.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**. 2 ed. Edimburgo: Pearson Education Ltda, 2007.

WANG, S.; HASSAN, M. A.; XIE, X. Relationship between suspended sediment load, channel geometry and land area increment in the Yellow River Delta. **Catena**, v. 65, n. 3, p.302-314, mar. 2006.

WU, X.; BI, N.; XU, J.; NITTROUER, J. A.; YANG, Z.; SAITO, Y.; WANG, H. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) delta lobe (1976–2013): Dominant roles of riverine discharge and sediment grain size. **Geomorphology**, v. 292, p.115-127, set. 2017

XAVIER, C. F. **Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da região metropolitana de Curitiba – Paraná**. 2005. Dissertação (Mestrado em Solos) – Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ZHANG, X.; HU, Y.; WANG, S. One-dimensional modelling of sediment deposition in reservoirs with sinking streams. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 17, n. 4, p.755-775, 20 fev. 2017.

ZHENG, S.; GUAN, W.; CAI, S.; WEI, X.; HUANG, D. A model study of the effects of river discharges and interannual variation of winds on the plume front in winter in Pearl River Estuary. **Continental Shelf Research**, v. 73, p.31-40, fev. 2014

ZIEMIŃSKA-STOLARSKA, A.; POLAŃCZYK, A.; ZBICIŃSKI, I. 3-D CFD simulations of hydrodynamics in the Sulejow dam reservoir. **Journal Of Hydrology And Hydromechanics**, [s.l.], v. 63, n. 4, p.334-341, 1 dez. 2015.